

¿ADÓNDE VA A CAER ESTE GLOBO?

ACERCA DEL FUTURO DE LA TIERRA

ÓSCAR JOSÉ MESA SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
MEDELLÍN, MARZO DE 2006

CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Clima	5
2.1. Componentes del Sistema Climático	5
2.1.1. El Sistema Solar	5
2.1.2. La Atmósfera	9
2.1.3. La Hidrosfera	13
2.1.4. La Biosfera	18
2.1.5. La Litosfera	21
2.2. Balance Global de Energía	23
2.2.1. Balance de Radiación Simple	23
2.2.2. Efecto Invernadero	23
2.2.3. Ajuste Convectivo	27
2.2.4. Distribución de Insolación y Flujo de Energía	29
2.3. Circulación Atmosférica	33
2.3.1. Base Física	34
2.3.2. Descripción	40
2.4. Circulación Oceánica	46
2.5. Sensibilidad y Retroalimentación	54
2.6. Variabilidad climática	60
2.6.1. Breve historia del clima de la Tierra	60
2.6.2. Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur	64

2.6.3.	Otros patrones de variabilidad	68
2.6.4.	Efecto de erupciones volcánicas	70
2.7.	Ejercicios	71
3.	Cambio Climático	77
3.1.	Resumen del reporte del IPCC	78
3.2.	Evidencias	83
3.2.1.	Problemas de detección	83
3.2.2.	Temperatura	84
3.2.3.	Ciclo hidrológico	91
3.2.4.	Antecedentes	102
3.3.	Futuro	106
3.3.1.	Predicciones	106
3.3.2.	Incertidumbre	107
3.3.3.	Una nueva ciencia	112
3.4.	El ciclo del carbono.	117
3.4.1.	General	117
3.4.2.	Procesos en la biosfera terrestre	118
3.4.3.	Procesos en el océano	120
3.4.4.	Procesos en la litosfera	123
3.4.5.	Algunas Preguntas	124
3.5.	Ejercicios	125
4.	Energía	127
4.1.	Tendencias	128
4.2.	Alternativas	139
4.3.	Eficiencia en el uso	144
4.4.	Fuentes renovables	147
4.4.1.	Hidroelectricidad	147
4.4.2.	Energía solar	149
4.4.3.	Energía eólica	149
4.4.4.	Bio-combustibles	150
4.4.5.	Hidrógeno	152
4.4.6.	Nuclear	154
4.4.7.	Otros temas	155
4.5.	Ejercicios	156

5. Agua	157
5.1. Crisis	157
5.1.1. Falta de acceso	157
5.1.2. ¿Agotamiento?	158
5.1.3. Agua en botella	163
5.1.4. Impacto del Cambio Climático	164
5.1.5. Polución	165
5.2. Naturaleza del agua	165
5.2.1. ¿Qué es el agua?	165
5.2.2. Usos del agua	166
5.2.3. Variabilidad	168
5.2.4. Calidad	169
5.3. Propuestas	170
5.3.1. Derecho y participación	170
5.3.2. Planeación	171
5.3.3. Uso Eficiente del Agua	172
5.4. Economía del agua	173
5.5. Ejercicios	176
6. Tierra	179
6.1. Agricultura	180
6.2. Ganadería	182
6.3. Erosión	183
6.4. Deforestación	184
6.5. Biodiversidad	195
6.6. Pesca	196
6.7. Ciudades	197
6.8. Materiales	199
6.9. Ejercicios	207
7. Social	209
7.1. Demografía	209
7.2. Igualdad	217
7.3. Desarrollo	221
7.4. Educación	229
7.5. Salud	233
7.6. Nueva Economía	237
7.7. Acelerando la Transición	240
7.8. Ejercicios	242

A. Lecturas	245
A.1. Declaración del Milenio	245
A.2. La ciudad y la igualdad	257
A.3. Pensar en Grande	279
A.4. La Tragedia de los comunes	284
A.5. Externalidades	299
A.6. Decálogo de la Filosofía Liberal	308
Bibliografía	309
Índice Alfabético	319

LISTA DE FIGURAS

2.1. Superior: mediciones de la radiación solar incidente usando radiómetros a bordo de las misiones indicadas. Inferior: serie combinada de las diferentes mediciones, tomado de Quinn and Fröhlich, Nature, 401, pág. 841, 1999.	8
2.2. Serie de tiempo del número de manchas solares desde 1600, datos de http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html . . .	9
2.3. Principales capas de la atmósfera definidas de acuerdo con un perfil promedio de temperatura.	13
2.4. Ecuación de Clausius-Clapeyron, $e_s = e_0 \exp \left\{ \frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$, para la presión de vapor de saturación del agua e_s , en función de la temperatura T . L es el calor latente de evaporación y R_v es la constante de gases para el vapor de agua.	15
2.5. Distribución entre mar y continentes por bandas latitudinales. . . .	22
2.6. (Panel superior) Espectro normalizado de la radiación emitida por el Sol y la Tierra en función de la longitud de onda. (Panel intermedio) La fracción de la radiación absorbida mientras pasa por la atmósfera entre los 11 km y el tope en función de la longitud de onda. (Panel inferior) Semejante al anterior panel pero para toda la atmósfera completa. Se indican las moléculas que contribuyen a la absorción. Adaptada de Hartmann [1994].	24
2.7. Esquema de un modelo de dos capas para ilustrar el efecto invernadero.	26

- 2.8. Esquema de las componentes del balance energético en porcentajes de la constante solar. En el panel superior se representan los flujos de radiación de onda corta y en el inferior los de radiación de onda larga y el flujo de calores sensible y latente. Adaptada de Hartmann [1994]. 28
- 2.9. Izquierda: insolación diaria (Wm^{-2}) en el tope de la atmósfera en función de la latitud y época del año. Las áreas sombreadas representan cero insolación. La declinación solar se representa con línea punteada. Centro, de arriba hacia abajo: distribución latitudinal de la radiación solar incidente y radiación solar reflejada en el tope de la atmósfera (Wm^{-2}), para los meses de diciembre-enero-febrero (DEF), junio-julio-agosto (JJA) y promedio anual (Año). Derecha, de arriba hacia abajo: distribución latitudinal del albedo en %, la radiación solar absorbida, radiación terrestre emitida y la radiación neta en (Wm^{-2}), para los meses de diciembre-enero-febrero (DEF), junio-julio-agosto (JJA) y promedio anual (Año). Adaptada de Peixóto and Oort [1992]. 31
- 2.10. Mapas de la climatología del albedo promedio (incluye efecto de las nubes) para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario, escala de colores indicada. Calculados a partir de mediciones del Proyecto The Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) y elaborados por el departamento de Meteorología de la Universidad de Wisconsin. 32
- 2.11. Rango anual de temperatura superficial en K. La topografía no está representada para enfatizar el control dominante de la distribución tierra-mar en el ciclo anual de temperatura. Tomada de Monin [1975]. . . 33
- 2.12. Mapas de la climatología 1959-1997 de la radiación neta en Wm^{-2} para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-álisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon. 34
- 2.13. Mapas de la climatología 1959-1997 de la temperatura superficial en $^{\circ}C$ para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-álisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon. 35
- 2.14. Corte vertical latitudinal con el promedio zonal de viento zonal. Las líneas sólidas representan contornos de velocidad en intervalos de $5 ms^{-1}$, las líneas punteadas son contornos de temperatura en intervalos de $5 ^{\circ}C$, las áreas con vientos del este están sombreadas, el contorno correspondiente a $0 ^{\circ}C$ es más grueso. El cuadro superior es para los meses de diciembre-enero-febrero y el inferior para junio-julio-agosto. Climatología del reanálisis de NCEP/NCAR para 1959-1997. 37

- 2.15. Promedio zonal de la circulación meridional vertical. El cuadro superior es para los meses de diciembre–enero–febrero y el inferior para junio–julio–agosto. Climatología del reanálisis de NCEP/NCAR para 1959–1997. 38
- 2.16. Mapas de la climatología 1959–1997 de la presión atmosférica a nivel del mar en hPa y vientos superficiales en m/s para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-ánalisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon. 41
- 2.17. Mapas de la climatología 1959–1997 de la precipitación en mm para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-ánalisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon. 42
- 2.18. Mapas de la climatología 1959–1997 de la diferencia entre la precipitación y la evaporación en mm para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-ánalisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon. 43
- 2.19. Promedios zonales de la precipitación promedio anual (líneas sólidas) y evaporación promedio anual (líneas punteadas) como función de la latitud en metros por año. Cálculos del proyecto reanálisis 1958-1997 NCEP/NCAR. 45
- 2.20. Desviación de la densidad del agua de mar con respecto a un valor de referencia de 1000 kg/m^3 en función de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y la salinidad (‰). 47
- 2.21. Mapas de la climatología 1961–1990 de la temperatura superficial del mar en $^{\circ}\text{C}$ para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir archivo Global Sea-Ice and Sea Surface Temperature Data y elaborados por el Center for Ocean–Atmospheric Prediction Studies de la Universidad del Estado de la Florida, <http://www.coaps.fsu.edu>. 48
- 2.22. Mapa de la climatología 1961–1990 de la salinidad superficial del mar en g/kg para el mes de abril, representativo de los demás meses del año. NOAA, CIRES, CDC, <http://www.cdc.noaa.gov>. 49
- 2.23. Izquierda: esquema del cambio de la temperatura del mar con la profundidad y de las principales capas. Centro: esquema de la variación de los perfiles de temperatura oceánica para diferentes latitudes. Derecha: esquema del cambio de la densidad con la profundidad. 50

- 2.24. Panel superior: esquema de la circulación termohalina. Inferior: esquema de corte vertical de polo a polo por el Océano Atlántico a la derecha. Adaptada de Rahmstorf [2002] 51
- 2.25. Mapa de la altura de la superficie del mar en la parte superior y abajo esquema de la circulación superficial inducida por vientos. NOAA, CIRES, CDC, <http://www.cdc.noaa.gov>. 52
- 2.26. Esquema de las fases extremas del fenómeno ENSO en el Pacífico tropical: condiciones frías o La Niña (arriba) y cálidas o El Niño (abajo). Se ilustra la dirección predominante de los vientos, la distribución típica de la temperatura superficial del mar, la ubicación de las zonas de convección, la profundidad de la termoclina, las corrientes oceánicas y la intensidad de la surgencia de las aguas profundas. Adaptada de <http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/nino-home.html> 66
- 3.1. Anomalías en la temperatura anual promedio del aire en la superficie terrestre y en la superficie del mar en °C en el período de 1861 a 2000, en relación con el período de 1961 a 1990. Se muestran barras de error de estimación correspondientes a dos desviaciones típicas. Tomada de Folland et al. [2001]. 84
- 3.2. Mapa de la tendencia en la temperatura anual promedio del aire en la superficie terrestre y en la superficie del mar en °C por década representada por el tamaño y el color de un círculo según la escala gráfica. Los cuadros (a) a (d) representan respectivamente las tendencias estimadas para los períodos 1901 a 2000, 1910 a 1945, 1946 a 1975, y 1976 a 2000. Las tendencias se estimaron de anomalías promedio en cada grilla con requerimiento de que los promedios incluyeran al menos 10 datos. Para el período de 1901 a 2000, las tendencias de estimaron sólo para los puntos que tenían al menos 66 años de datos. El límite inferior en el número de datos para los otros períodos fue respectivamente de 24, 20, y 16 años. Tomada de Folland et al. [2001]. 85
- 3.3. Series de tiempo suavizadas de las anomalías de temperatura global promedio de la superficie del mar (curva azul), aire marino en la noche (curva verde) y aire sobre la superficie continental (curva roja). Las series cubren el período de 1861 a 2000 y las anomalías son relativas a 1961–1990. El suavizado corresponde a un filtro binomial de 21 puntos que da aproximadamente los promedios decenales. En el inserto se muestra la diferencia entre las series correspondientes a continente y mar. Los datos provienen de varias fuentes, ver Folland et al. [2001]. 86

- 3.4. Serie de tiempo del contenido de calor del océano en los 300 m más superficiales (anomalías) para los dos hemisferios y el globo. Note que $1,5 \times 10^{22}$ J equivale a un promedio de 1 Wm^{-2} al año, sobre toda la superficie terrestre. Las líneas verticales al rededor de cada estimación corresponden a más o menos una desviación estándar del error. Tomada de Folland et al. [2001]. 87
- 3.5. (Arriba) Anomalías del promedio global de temperatura para el período 1958 a 2000, relativas al promedio de 1979 a 1990 en la baja troposfera y la superficie. Observaciones de satélite (MSU 2LT) y de globos meteorológicos (UKMO 2LT). En el gráfico inferior se muestra la diferencia entre la temperatura de superficie y la de la baja troposfera (promedio de globos y satélites). (Abajo) Semejante a la anterior, pero para la baja estratosfera, calculada de datos de satélites (MSU 4 y SSU 15X) y globos (UKMO 4). La épocas correspondientes a las principales erupciones volcánicas están señaladas. En la parte inferior se muestra la diferencia entre los dos métodos de observación. Tomada de Folland et al. [2001]. 88
- 3.6. Tendencia del promedio anual del rango diurno de temperatura (diferencia entre el máximo y el mínimo) de 1950 a 1993, sólo para estaciones no urbanas, para obviar el problema de las islas de calor. El tamaño del círculo representa la magnitud de la tendencia según la escala indicada, el color azul representa decrecimiento y el rojo incremento. El conjunto de datos es más reducido que para el caso de las temperaturas medias. Tomada de Folland et al. [2001]. 89
- 3.7. Reconstrucción de la temperatura en °C del Hemisferio Norte en el milenio apartir de registros de anillos de crecimiento de árboles, corales, muestras de hielo y registros históricos (azul) y datos instrumentales (rojo) desde 1000 d.c hasta 1999. Se muestran una versión suavizada de la serie (negro) y el error de estimación correspondientes a dos desviaciones típicas (gris claro). Tomada de Folland et al. [2001]. 90
- 3.8. Series de tiempo del área cubierta por hielo marino en el Hemisferio Norte a nivel anual y para cada estación. Tomada de Folland et al. [2001]. 92
- 3.9. Una colección de registros de longitud de veinte glaciares en diferentes partes del mundo. Las curvas se han desplazado en el eje vertical para mejorar visualización en un solo cuadro. Datos de el Servicio Mundial de Seguimiento a Glaciares, tomado de Folland et al. [2001]. (<http://www.geo.unizh.ch/wgms/>) 93

- 3.10. Serie de tiempo del nivel relativo del mar en los últimos 300 años en Europa septentrional: Amsterdam, Países Bajos; Brest, Francia; Sheerness, Reino Unido; Estocolmo, Suecia (sin tendencia en el período 1774–1873 para eliminar hasta el primer orden la contribución del levantamiento isostático postglacial); Swinoujscie, Polonia (antes Swinemunde, Alemania) y Liverpool, Reino Unido. Los datos de esta última son de la “pleamar media ajustada” que incluyen un término nodal (18,6 años). La barra de escala indica ± 100 mm. Tomada de Folland et al. [2001]. 94
- 3.11. Tendencias entre 1900 y 1999 para la precipitación anual en diferentes celdas y bandas latitudinales. El área de los círculos es proporcional a la magnitud de la tendencia según la escala gráfica, el verde representa aumento y el café disminución. La tendencia se calculó, para cada celda de 5 grados de lado, a la serie del promedio de precipitación anual en la celda, expresada como porcentaje del valor normal para cada celda. En la leyenda lateral de cada mapa se muestra los promedios para seis bandas latitudinales (85N a 55N, 55N a 30N, 30N a 10N, 10N a 10S, 10S a 30S, y 30S a 55S). Los valores significativos en la tendencia, de acuerdo a una prueba-t al 5%, se señalan con un asterisco. Tomada de Folland et al. [2001]. 96
- 3.12. Semejante a la figura anterior, pero para los valores de precipitación de los trimestres indicados mediante la abreviatura de los meses correspondientes. Tomada de Folland et al. [2001]. 97
- 3.13. Mapa esquemático para representar las tendencias en los promedios anuales de la presión de vapor en la superficie, para el período 1975 a 1995. La tendencia se expresa como porcentaje de la media para el período 1975 a 1995. Las áreas sin puntos no tienen datos suficientes. Las zonas con sombra azul tienen tendencia creciente significativa, y con sombra café tendencia significativa decreciente. El tamaño y el color de los puntos representa la magnitud y el signo de la tendencia según la escala gráfica incluida. La calidad de la información puede dar lugar a dudas, por tanto el nivel de confianza de la estimación debe interpretarse con cautela. Tomada de Folland et al. [2001]. . . 98

- 3.14. Series de tiempo de las anomalías normalizadas (con tendencias lineales) de las siguientes variables para la cuenca del Mississippi o para índices asociados: el índice de la oscilación del Atlántico Norte (NAO), la precipitación anual promedio (P), la escorrentía natural (Q), la evaporación natural (E), la evaporación total (E+U), U representa el uso consuntivo, la evaporación de tanque en el período mayo–septiembre (N), y la temperatura promedio en la cuenca (T). Para T y N la escala vertical está invertida. La suavización corresponde a un filtro binomial de 11 puntos, las anomalía son respecto a las medias mensuales, normalizadas por las respectivas desviaciones típicas. Tomada de Milly and Dunne [2001]. 99
- 3.15. Izquierda: número total de ciclones tropicales por lustro y por categorías (1 en azul, 2 y 3 en verde, 4 y 5 en naranja). Derecha: serie de tiempo suavizada de las temperaturas superficiales del mar en cada una de las cuencas sobre las cuales ocurren los huracanes: el Atlántico Norte (NATL: 90 a 20E, 5 a 25N, de junio a octubre), el Pacífico Oeste (WPAC: 120 a 180E, 5 to 20N, de mayo a diciembre), el Pacífico Este (EPAC: 90 a 120W, 5 to 20N, de junio a octubre), el Pacífico Suroeste (SPAC: 155 a 180E, 5 a 20S, de diciembre a abril), el norte del Océano Índico (NIO: 55 a 90E, 5 a 20N, de abril a mayo y de septiembre a noviembre), y el sur del Océano Índico (SIO: 50 a 115E, 5 a 20, de noviembre a abril). La intensidad de los huracanes corresponde a la escala Saffir–Simpson. Adaptada de Webster et al. [2005]. 100
- 3.16. Series de tiempo de las anomalías en la temperatura del mar en la franja tropical correspondiente a latitudes entre 30N y 30 S (curva azul) y de la potencia disipada por los ciclones tropicales a nivel global, acumulada anualmente, una medida de la intensidad anual de los ciclones tropicales (escalada). La potencia disipada es proporcional al cubo de la velocidad de los vientos superficiales, integrando sobre la vida de cada tormenta. Detalles del análisis se encuentran en Emanuel [2005]. La figura se adaptó de <http://wind.mit.edu/emanuel/anthro2.htm>, que contiene algunas actualizaciones y correcciones respecto al artículo original. 101

3.17. Registros de la variabilidad climática durante el Holoceno y la última transición climática, incluyendo los eventos de hace 8200 años, el llamado Younger Dryas y la reversa del frío antártico (regiones sombreadas). Los cambios en la concentración del isótopo de oxígeno-19 o del isótopo deuterio del hidrógeno son indicadores de la variabilidad climática. La escala gris para el Atlántico Norte tropical corresponde a una medida de la temperatura superficial del mar que se deduce del color de las capas de sedimentos ricas en plancton. Tomada de Folland et al. [2001].	103
3.18. Variaciones de la temperatura y las concentraciones atmosféricas de metano y dióxido de carbono derivadas de aire atrapado en núcleos de hielo en la Antártica. Tomada de Folland et al. [2001].	105
3.19. Caudal medio anual de la circulación termohalina del Atlántico Norte, resultado de simulaciones por diferentes modelos para un escenario de forzamiento por emisión de CO ₂ . Se muestran anomalías respecto a la media del período (1961 a 1990). Tomada de Cubasch et al. [2001].	109
4.1. Precio en dólares del crudo de referencia en el último año.	129
4.2. Crecimiento histórico y proyectado de la demanda global de energía para las principales fuentes. Proyección para el escenario de referencia. Datos en gigatoneladas equivalentes de petróleo (1 GTOE = 11,63 PWh=41,868 EJ). Adaptada de IEA [2004].	130
4.3. Relación entre el producto bruto global y los diferentes usos finales de la energía. Datos en Gigatoneladas equivalentes de petróleo (1 GTOE = 11,63 PWh=41,868 EJ). Adaptada de IEA [2004].	131
4.4. Serie histórica y proyectada de la emisión anual de CO ₂ a la atmósfera como resultado de la quema de combustibles fósiles para el escenario de referencia y el escenario alternativo. Datos en millones de toneladas de CO ₂ , 10 000 millones de toneladas de CO ₂ equivalen a 3,67 Pg de carbono. Adaptada de IEA [2004].	134
4.5. Serie histórica y proyectada de la emisión anual de CO ₂ a la atmósfera como resultado de la quema de combustibles fósiles para el escenario de referencia por regiones. Datos en Pg de CO ₂ , 10 Pg de CO ₂ equivalen a 3,67 Pg de carbono. La organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD) comprende la mayoría de los países desarrollados, las economías en transición son los países antes socialistas. Adaptada de IEA [2004].	135
4.6. Serie histórica y proyectada de la intensidad de CO ₂ de la economía, definida como la relación entre la cantidad de CO ₂ emitido a la atmósfera y el producto interno bruto. Adaptada de IEA [2004].	136

4.7.	Expansión de la capacidad de generación de electricidad para los próximos 30 años. Adaptada de IEA [2004].	140
4.8.	Reducción proyectada en los costos de equipos para aprovechamiento de fuentes renovables de energía. Adaptada de IEA [2004].	141
4.9.	Precios de generación de electricidad para diferentes fuentes renovables, comparados con los precios del mercado. Adaptada de IEA [2004].	142
5.1.	Índice de escasez del agua estimado para el año 2025 para un escenario de extrapolación de tendencias. Adaptada de Cosgrove and Rijsberman [2000].	162
6.1.	Secuencia típica de la deforestación, expansión económica y desarrollo de la gobernabilidad en la colonización de zonas vírgenes. Adaptado de Nepstad et al. [2002]	185
6.2.	Países con mayor frontera forestal. Adaptado de Nepstad et al. [2002]	186
6.3.	Crecimiento de la población en la Amazonia brasilera. Datos de IBGE	187
6.4.	Avance de la deforestación en la Amazonia brasilera (Rondonia) vista desde imágenes de satélite en 1973, 1991 y 1999. En el cuadro inferior a la derecha, quemas forestales entre junio y octubre de 1995. Datos de la Universidad de Wisconsin en Madison	188
6.5.	Esquema del volumen de control para ecuación del balance hídrico .	190
7.1.	Población mundial, serie histórica y proyecciones. La línea superior corresponde al modelo $y = a(1 + be^{-cx})^{-1}$. La proyección inferior es mediante la ecuación $y = a(1 + e^{b-cx})^{-d}$. Datos de UN [2005]. . . .	210
7.2.	Series históricas de la cobertura bruta en educación (total de matriculados sobre el total de población en el grupo de edades establecido para cada modalidad). La línea superior corresponde a la primaria, luego la secundaria, la pre-escolar y por último la superior (línea punteada). Datos de MEN-Colombia [2002].	229
7.3.	Relación entre esperanza de vida e ingreso per cápita en diferentes épocas. Tomada de Bloom [2005].	235
A.1.	Esquema de curvas de demanda y oferta privada y social para ilustrar una externalidad negativa. Adaptada de Wikipedia [2006].	302
A.2.	Esquema de curvas de demanda privada y social y curva de oferta para ilustrar una externalidad positiva. Adaptada de Wikipedia [2006]. .	303

LISTA DE TABLAS

3.1. Incrementos de carbono en la atmósfera, las emisiones por quema de combustibles fósiles, y los cambios en los flujos con la atmósfera. Datos en Pg por año, estimados como promedio para la década indicada.	81
4.1. Demanda mundial histórica y proyectada de energía primaria en (MTOE) para el escenario de referencia [IEA, 2004]. No incluye leña. Tasa en porcentaje.	132
4.2. Consumo final mundial de energía en (MTOE) para diferentes componentes de la demanda total. Tasas en porcentaje. Datos históricos y proyectados según escenario de referencia de IEA [2004]	133
4.3. Crecimiento global de las emisiones de CO ₂ para los principales sectores económicos y para varias regiones. Datos para los períodos indicados de acuerdo a observaciones y a proyecciones según el escenario de referencia. Valores en millones de toneladas. Adaptada de IEA [2004].	137
4.4. Indicadores económicos y energéticos básicos para China, incluye comparativo con datos del mundo y tasas anuales de crecimiento promedio en la década 1990-2000.	138
4.5. Comparación entre las metas del Protocolo de Kyoto y las proyecciones. Datos en Pg de CO ₂ por año.	139
4.6. Rango indicativo de la vida útil (años) de varios equipos asociados al consumo de energía.	146
6.1. Crecimiento y declinación en la producción de alimentos per cápita. Tomada de Brown [2001]	182

6.2.	Tasa de desecho y uso de materiales desechables en los Estados Unidos durante 1997. Tomada de Brown [2001]	200
6.3.	Producción de metales y cantidad de mena extraída para su producción. Tomada de Brown [2001]	201
7.1.	Promedio de años de escolaridad por estrato en Colombia para el año 2000. Tomada de [Montenegro and Rivas, 2005; pág. 165]	232
7.2.	Enfermedades emergentes. Tomada de [Bloom, 2005; pág. 73]	234
7.3.	Causas principales de pérdida de años ajustados de vida sana (AIA). Tomada de [Bloom, 2005; pág. 73]	236

Prefacio

Winston Churchill decía que *“un fanático es alguien que no puede cambiar de mentalidad y no quiere cambiar de tema”*. Una cordial invitación a abrirse al cambio.

Los trabajos de Brown [2006, 2003, 2001] y de otras numerosas fuentes han servido como inspiración. No hay mucho sentido en reinventar la rueda, se da todo el crédito debido. Por razones de historia personal se profundiza más en los temas de clima, cambio climático, agua y energía. Se quiere hacer énfasis en la información base, los datos y las cifras. Además de la visión integral se aspira a motivar trabajo futuro sobre alguno de los temas específicos. El contexto global es evidente desde el título, ocasionalmente hay referencia a la situación colombiana.

El compromiso entre un texto universitario y un escrito amplio para personas interesadas ha sido difícil de mantener. Incluso en el estricto texto universitario satisfacer todas las expectativas no es fácil por la diversidad de campos. Se aspira a que un economista, por ejemplo, no encuentre una barrera infranqueable en el capítulo sobre clima. Esto tiene un precio para todos. En particular debe haber voluntad de trabajo de parte del lector. Parte de nuestro mensaje es que hay que ser más globales. En todos los temas hay un esfuerzo por presentar lo fundamental en términos amplios, antes de entrar en mayor detalle. Con la plena conciencia de que algunos lectores pueden no querer profundizar en una primera lectura, pero con la esperanza en que más adelante encuentren la motivación.

Otra estrategia empleada para atender tan diversas demandas son los ejercicios, en los cuales hay la oportunidad de profundizar según el interés. La mayoría de ellos son problemas desafiantes, algunos abiertos, invitaciones a

proyectos de envergadura. También se quiere estimular el esfuerzo por cuantificar, siguiendo en cierta medida la propuesta de Harte [1988]. Pedagógicamente estamos convencidos de que se aprende haciendo.

Aunque la humanidad está ante desafíos graves, no hay pretensión alarmista. No se puede ignorar antecedentes como el del informe de 1972 del Club de Roma que auguraba un desplome del crecimiento económico mundial al agotarse los recursos y dispararse la población. Igualmente antes Malthus había planteado el tema demográfico. Aunque la realidad no ha seguido predicciones tan sombrías, es obligatorio un reexamen sobre el crecimiento en un mundo finito. Esto nos conduce a terrenos relativamente inexplorados en economía y a asuntos propios de la filosofía y la ética.

Nunca podré expresar según lo merecido el agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia y a mi familia.

What can private persons do meanwhile? They can agitate, by pointing out the effects of modern war and the danger of the extinction of Man. They can teach men not to hate peoples other than their own, or to cause themselves to be hated. They can value, and cause others to value, what Man has achieved in art and science. They can emphasize the superiority of co-operation to competition.

Finally, have I done anything to further such ends?

Something perhaps, but sadly little in view of the magnitude of the evil. Some few people in England and the USA I have encouraged in the expression of liberal views, or have terrified with the knowledge of what modern weapons can do. It is not much, but if everybody did as much this Earth would soon be a paradise. Consider for a moment what our planet is and what it might be. At present, for most, there is toil and hunger, constant danger, more hatred than love. There could be a happy world, where co-operation was more in evidence than competition, and monotonous work is done by machines, where what is lovely in nature is not destroyed to make room for hideous machines whose sole business is to kill, and where to promote joy is more respected than to produce mountains of corpses. Do not say this is impossible: it is not. It waits only for men to desire it more than the infliction of torture.

There is an artist imprisoned in each one of us. Let him loose to spread joy everywhere.

Bertrand Russell's last manuscript, 1967.

CAPÍTULO 1

Introducción

El clima global está cambiando debido a la influencia del hombre. Esta tendencia continuará, a pesar de que se tomen acciones de fondo para transformar el modelo energético. La inercia de la infraestructura energética y el tiempo de permanencia del CO₂ en la atmósfera así lo indican. Además, está en duda que se tomen medidas efectivas. Los Estados Unidos, el principal responsable de las emisiones de gases invernadero, no lo ha hecho y no parece que haya siquiera una esperanza de que lo haga en el inmediato futuro. Las acciones del resto de países, acordadas en el Protocolo de Kyoto, a pesar de lo importantes, no serán suficientemente efectivas. Las consecuencias del cambio climático no serán menores, pero no hay la suficiente conciencia entre el público en general, ni entre los responsables de las decisiones. Subsisten muchas incertidumbres que los científicos tienen que reducir, cuantificar y saber comunicar mejor. Para la mayoría de profesiones las implicaciones prácticas son de fondo y van a ser cada vez más evidentes en los próximos años y décadas. Por ejemplo, los estudios y diseños que los ingenieros realizan para la prevención y control de inundaciones se basan en la hipótesis de que el pasado contiene la información necesaria para cuantificar los eventos extremos del futuro. El cambio climático le resta fundamento a estos métodos que por lo tanto necesitan rehacerse. Para otras profesiones los desafíos son semejantes o incluso mayores. La infraestructura energética tiene que rediseñarse para mejorar la eficiencia e incorporar en mayor medida las llamadas fuentes renovables. La agricultura, los hábitos de alimentación, las ciudades, la arquitectura, el uso de los materiales, la educación, las relaciones sociales, la administración, la política, en fin, todas las actividades humanas requieren reexaminarse ante el desafío de

la sostenibilidad.

Durante la época de las llamadas guerras mundiales y en particular ante la amenaza atómica y nuclear fue evidente una preocupación por el futuro de la humanidad. La preocupación por recursos no renovables tiene menos de un siglo y todavía más reciente es la inquietud por los recursos renovables, que inicialmente se miraron sólo localmente. El concepto de sostenibilidad apenas está entrando al diccionario. El hombre es sólo una de las componentes del sistema Tierra, por importante que nos parezca. El nacimiento de la física clásica nos sacó de la ilusión de la Tierra como centro del universo. Subsecuentes desarrollos científicos han ayudado a romper otras ilusiones centristas, pero la fragmentación que resultó de la explosión de conocimiento dejó algunas en pie. Entre ellas la idea subyacente de que la Tierra como medio ambiente en el cual se desarrolla la actividad humana era inmutable e infinita. Pero la misma ciencia permitió a la humanidad adquirir la capacidad de cambiar inadvertidamente la Tierra, más allá de los cambios locales o regionales que hemos experimentado desde el neolítico. Para conocer (entender y predecir) la Tierra y los cambios que le estamos produciendo es necesario integrar conocimientos parciales para abocar las interacciones entre los subsistemas, relaciones que tienen importancia de primer orden. Los problemas derivados del cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la explosión demográfica, las desigualdades sociales, la aglomeración en ciudades, la escasez del agua, la pobreza, la acumulación de desperdicios y la erosión ya afectan regiones y tienden a agravarse y a expandirse. Esta capacidad de perturbar trae nuevas preguntas que sólo se pueden abordar desde una mirada integral.

No hay duda de que muchas decisiones habrá que tomarlas sin total conocimiento. Por eso es necesario divulgar lo que se sabe y hacer claridad sobre lo que se desconoce. Este trabajo busca llegar a muy diversas profesiones, en particular contribuir a la formación amplia que todo estudiante universitario requiere. Ojalá tuviéramos mayor audiencia. El origen es un curso de contexto, abierto a todos los estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia. Nos apoyamos en muchas fuentes, en particular el trabajo de Brown [2003] es un marco de referencia. El diagnóstico y la propuesta tienen como ejes principales el cambio climático, la deforestación, la erosión, la crisis del agua y la energía, y los problemas sociales, incluyendo la explosión demográfica.

En los últimos cincuenta años la población se multiplicó por 2,44 al pasar de 2,5 a 6,1 mil millones. Los ingresos totales se incrementaron siete veces al pasar de 1,7 a 12 billones (10^{12}) de dólares americanos. El ingreso per capita se multiplicó por tres, la producción de granos por tres, el consumo de energía por 5,4, el del agua por seis, la captura de peces por cinco, la productividad agrícola por 2,6, pero el área cultivada sólo por 1,14. Las predicciones para los próximos años son de un crecimiento poblacional ligeramente inferior al an-

terior y crecimiento en la economía y en el consumo de recursos semejante al crecimiento histórico. Pero varias regiones han llegado a niveles de agotamiento de los recursos. Estamos cortando árboles más rápido de lo que se pueden regenerar, el sobrepastoreo está desertificando vastos territorios. Hay sobreexplotación de los acuíferos y disminución de caudales de los ríos. Las tasas de erosión superan las de formación de los suelos y se está perdiendo la fertilidad de la tierra. Estamos pescando más rápido que la capacidad de reproducción de los peces. Hay pérdida considerable de biodiversidad, acumulación de desperdicios. Estamos inyectando CO₂ a la atmósfera a tasas más altas que las que puede absorber intensificando el efecto invernadero, que lleva al calentamiento global. Las consecuencias para la vegetación y la fauna son en muchos casos negativas. El calentamiento también trae aumento del nivel del mar. El desafío es global. Por mucho tiempo la humanidad vivió de los rendimientos del patrimonio natural, hoy estamos consumiendo no sólo los intereses sino también el capital.

El crecimiento económico no se ha reflejado en beneficios para todos. Socialmente hay una brecha que cada vez se amplía más entre quienes tienen acceso a todos los medios y una gran mayoría privada de hasta los más esenciales elementos de subsistencia. Más de 800 millones padecen de hambre, la mayoría en África al sur del Sahara y en India. La desnutrición afecta a un quinto de la población y otro quinto padece de obesidad. Más de 875 millones de adultos son analfabetas y 115 millones de niños no van a la escuela, 60% de los analfabetas son mujeres. Más de mil millones padecen enfermedades como paludismo, tuberculosis, disentería y sida que podrían prevenirse o erradicarse. En años recientes hemos asistido a la aparición de enfermedades sin antecedentes. La desigualdad de género es aberrante en muchos lugares.

Los países en vías de desarrollo han escogido un modelo copiado de los más desarrollados que no es sostenible para toda la Tierra. El caso de China es dramático por su tamaño. La demanda por energía ya compite por los alimentos que pueden convertirse en combustibles. La geopolítica de la escasez empieza a determinar el orden mundial. Los cálculos más optimistas muestran que no hay manera de acomodar tal crecimiento. Por ejemplo, si el número de automóviles per capita en China alcanza los estándares actuales de los Estados Unidos (3 carros por cada 4 personas), llegaría a 1100 millones de carros, mucho más que la flota mundial actual de 800 millones. Sólo para estacionamiento, calles y carreteras se necesitaría un área nueva igual a la que tiene actualmente sembrada en arroz. Además, el efecto de tal eventualidad sobre el consumo de combustibles, lubricantes, caucho, plástico, acero etc. se sale de toda proporción con los niveles actuales.

La arqueología tiene ejemplos de civilizaciones admirables que declinaron y desaparecieron por efecto de cambios ambientales. Hay varios casos que me-

recen consideración. Uno de ellos es el de la civilización sumeria, hace 6 000 años, que fue próspera cuna de las primeras ciudades y de la primera forma conocida de escritura. Todo indica que la salinización de los suelos, producto de una irrigación inadecuada, acabó con su agricultura y precipitó su declinación. ¿Estamos frente a una crisis ambiental semejante a escala de toda la Tierra?

Pero no sólo diagnósticos y llamados de atención son necesarios, los aportes constructivos son más urgentes. Nuestra propuesta para la Tierra incluye la substitución de combustibles fósiles por alternativas más limpias como la energía eólica, la energía solar, las celdas de combustible, las pequeñas centrales hidroeléctricas, los bio-combustibles. El predominio del transporte público sobre el automóvil, de la economía del reuso y reciclado de materiales en lugar de la del desperdicio y los desechables, la mejora en la eficiencia del uso del agua y la energía. El aprovechamiento sostenible de los bosques. El rediseño de las ciudades para los ciudadanos, con predominio de caminos peatonales y ciclovías. En la economía, los precios deben reflejar los costos ambientales. Mediante permisos transables o cruce de subsidios e impuestos el mercado debe enviar las señales ambientales necesarias para un desarrollo sostenible. La universalización de la educación, no sólo de la elemental, es fundamental para la equidad social, en el sentido de igualdad de oportunidades. La educación de la mujer es fundamental en sí misma y para asegurar los derechos reproductivos y la capacidad de decisión responsable sobre la procreación. La salud preventiva, apoyada en adecuada nutrición y niveles de ejercicio adecuados debe redundar en aumento de la esperanza de vida. El desarrollo debe significar mayor libertad, igualdad de oportunidades.

Algunas de estas propuestas implican desarrollos tecnológicos, otras ajustes al sistema económico y político. Los ciclos de innovación tecnológica requieren intervención, las decisiones globales requieren desarrollo de la gobernabilidad global. La democracia requiere profundización.

Tal plan es factible, su financiación requiere una fracción de lo que actualmente se dedica a la guerra. El único factor crítico es la voluntad política.

CAPÍTULO 2

Fundamentos del Clima Terrestre

2.1. Componentes del Sistema Climático

El clima no es sólo resultado de lo que ocurre en la atmósfera. La comprensión de la importancia de las otras esferas apenas empieza a ser reconocida por la ciencia moderna, aunque en el Renacimiento había plena conciencia cuando Leonardo hablaba de “*un sólo océano*” para referirse a la atmósfera y al mar. La influencia de la hidrosfera en el clima va más allá de los efectos del océano, involucrando el hielo, el vapor de agua y el agua en los continentes. Los efectos del Sol, la biosfera y la tierra sólida son hoy reconocidos. Los ciclos biogeoquímicos de varios elementos, en particular el del carbono está en el núcleo del sistema. Sin embargo ha habido divorcio entre disciplinas que apenas se empieza a superar. La complejidad de interacciones, la amplitud de escalas espaciales y temporales y la diversidad de las ciencias básicas involucradas hace de este campo del saber humano uno muy desafiante e interesante. Para completar, la acción del hombre ha llegado a niveles sin precedentes y la predicción de los efectos del cambio climático es hoy una urgencia fundamental para orientar las decisiones necesarias.

2.1.1. El Sistema Solar

La energía que mantiene el clima terrestre proviene del Sol. Para efectos prácticos, en la época actual podemos considerar constante y estable esta fuente de energía. A escalas temporales mayores, el asunto es un poco más complejo. La teoría estelar clasifica al Sol como una estrella amarilla ordinaria, de la clase

espectral G2 [Marov, 1985]. En nuestra galaxia se estima que pueden haber 10^{11} estrellas, con luminosidad desde diez mil veces menos hasta cien mil veces más que nuestro Sol. La temperatura de emisión de estas estrellas varía desde 2 000 K hasta 30 000 K, mientras la del Sol es aproximadamente 6 000 K. En el núcleo del Sol se genera energía por fusión. Para este tipo de estrellas se estima su vida en unos 11 mil millones de años de los cuales ha transcurrido la mitad para el Sol.

Se estima que la luminosidad del Sol ha aumentado de manera constante desde la formación del sistema solar, en aproximadamente un 30 %. El incremento esta asociado a la conversión de hidrógeno a helio, con el consecuente incremento en densidad, temperatura del núcleo, tasa de fusión y producción de energía.

Si todos los demás factores fueran iguales a los actuales, la Tierra en su comienzo sería tanto más fría que ahora. Sin embargo, la evidencia geológica apunta a lo contrario. Rocas sedimentarias de hace 4 mil millones de años indican la presencia de agua líquida. Y no hay evidencia de glaciaciones con antigüedad mayor de 3 mil millones de años. Una posible explicación podría ser por un efecto invernadero más pronunciado durante esa época, para lo cual se requiere una más alta concentración de CO_2 . De todas maneras, no hay explicación satisfactoria para este acertijo, que se conoce como el problema del débil Sol joven (faint young sun problem).

A pesar de la falta de explicación a este importante problema paleoclimático, la incidencia de este incremento de la luminosidad solar sobre el clima reciente no es significativa. Por ejemplo, desde comienzo del Cuaternario (2 millones de años) hasta el presente, suponiendo un crecimiento lineal, el incremento es de menos de 0,01 %. Para el Holoceno (últimos 10 mil años), este incremento sólo alcanza al 0,00006 %, lo cual es despreciable en ambos casos.

Los datos básicos del Sol son su masa estimada en $1,99 \times 10^{30}$ kg, un radio de $6,96 \times 10^8$ m, la distancia media a la Tierra de $1,496 \times 10^{11}$ m y su luminosidad de $3,9 \times 10^{26}$ Js⁻¹. Esta última corresponde al total de energía, en forma de radiación electromagnética, que emite el Sol en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se sabe que tal energía proviene de fusión nuclear. Por tanto la fórmula de Einstein $E = mc^2$ permite calcular la masa que el Sol convierte en energía por unidad de tiempo, que es $4,33 \times 10^9$ kg/s. Aunque parece un número muy grande, es insignificante en comparación con su masa, que es 21 órdenes de magnitud mayor. La luminosidad se puede calcular conociendo el área superficial del Sol y la ley de Stefan-Boltzmann de radiación, $F = \sigma T^4$. En la que se establece que la densidad del flujo de energía emitida por un cuerpo negro F , con unidades Wm^{-2} , es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta T . La constante de proporcionalidad σ es $5,67 \times 10^{-8}$ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Por lo tanto la temperatura de la superficie del Sol es 5 796 K.

Si se asume que la emisión es isotrópica, es decir independiente de la dirección, la distancia al Sol determina la cantidad de energía que recibe cada planeta. Como se verá, tal factor es importante para entender el clima de nuestros vecinos, pero no es el único factor.

Hoy se reconocen nueve planetas en el sistema solar, aunque recientemente se han encontrado otros objetos que podrían aumentar la cuenta hasta 11 si son aceptados como tales, o en caso contrario, eventualmente degradar a Plutón y quedar sólo en 8.

Con respecto al clima, las características fundamentales de los planetas son la geometría de su órbita y de su rotación, su composición y la composición de su atmósfera. La distancia al Sol, la excentricidad, la duración del año y el día, la oblicuidad del eje de rotación y la longitud del perihelio determinan la cantidad de insolación recibida y su distribución espacial y temporal.

La medición directa de la radiación solar que llega al tope de la atmósfera, realizada desde satélites, apenas tiene al rededor de treinta años. La exactitud de estas estimaciones es bastante buena, los errores están entre el 0,5 y el 0,1 %, según el aparato. En la Figura 2.1, se observa la variación en el tiempo de la constante solar, S_0 , por tres de estos métodos de medición. La constante solar se define como el flujo de radiación solar por unidad de área perpendicular a los rayos, a la distancia media de la Tierra.

La mejor estimación de S_0 es $1367 \pm 1,4 \text{ Wm}^{-2}$. Puede verse que hay un ciclo de 11 años que sigue el ciclo observado de las manchas solares (ver Figura 2.1). La variación entre el máximo y el mínimo es apenas de unos $1,5 \text{ Wm}^{-2}$, con la máxima radiación coincidiendo con el máximo del número de manchas. Desde los comienzos de la observación celeste con telescopio se lleva un recuento muy organizado de las manchas solares. Las manchas son regiones más frías del Sol que aparecen, crecen, se trasladan y desaparecen, siguiendo un patrón bien definido en forma de mariposa, cuando se dibuja su latitud contra el tiempo. Este patrón parece se explica por conservación de momento angular. La Figura 2.2 muestra la serie de tiempo observada del número de manchas solares.

La serie histórica del número de manchas tiene una periodicidad cercana a 11 años [Hoyt and Schatten, 1996]. Si se tiene en cuenta la alternación en la polaridad magnética de los pares de manchas el período pasa a ser 22 años en vez de 11. Además, la serie tiene variaciones a otras escalas (por ejemplo secular). La explicación de que la radiación tenga su máximo cuando el área cubierta por manchas es mayor viene de que las manchas van normalmente acompañadas por zonas más brillantes, llamadas féculas, que compensan con creces la disminución de la radiación en las zonas más frías de las manchas.

Hay todavía debate acerca de la influencia de esta variabilidad solar en el clima terrestre. La mayoría considera muy pequeña la variación para ser significativa. Hartmann [1994; pág. 291] estima que un cambio de 1 Wm^{-2} se

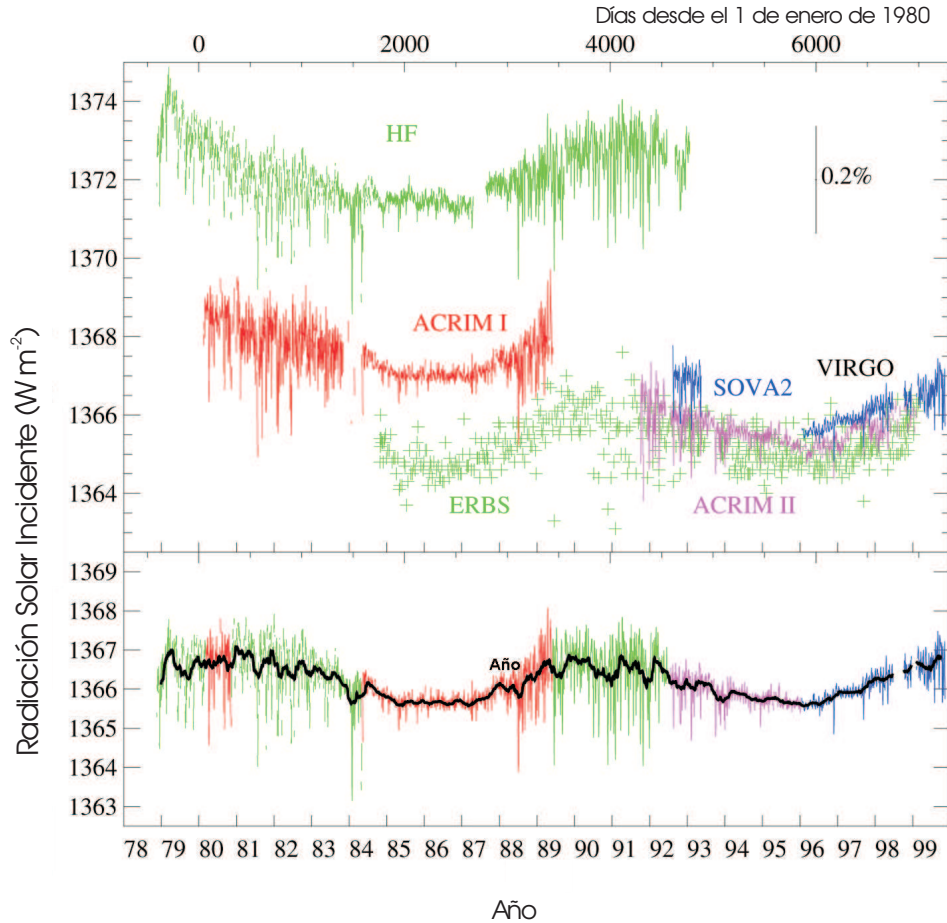


Figura 2.1: Superior: mediciones de la radiación solar incidente usando radiómetros a bordo de las misiones indicadas. Inferior: serie combinada de las diferentes mediciones, tomado de Quinn and Fröhlich, *Nature*, 401, pág. 841, 1999.

traduce en apenas $0,175 \text{ W m}^{-2}$ de forzamiento, lo que con una sensibilidad de $0,5 \text{ K/W m}^{-2}$ conduce a menos de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ de respuesta. También se argumenta que no hay evidencia estadística de ciclos de 11 años en los registros climáticos [Dickinson, 1975].

En sentido contrario argumentan Kelly and Wigley [1992] y Schlesinger and Ramankutty [1992]. En la serie de temperatura en Inglaterra central, Thomson [1995] encontró clara evidencia en el espectro de ciclos de 11 años. Adicionalmente, hacia 1645-1715, las manchas solares estuvieron prácticamente ausentes, período que se conoce con el nombre de El Mínimo de Maunder y durante esta época se presentó en Europa lo que se conoce como La Pequeña

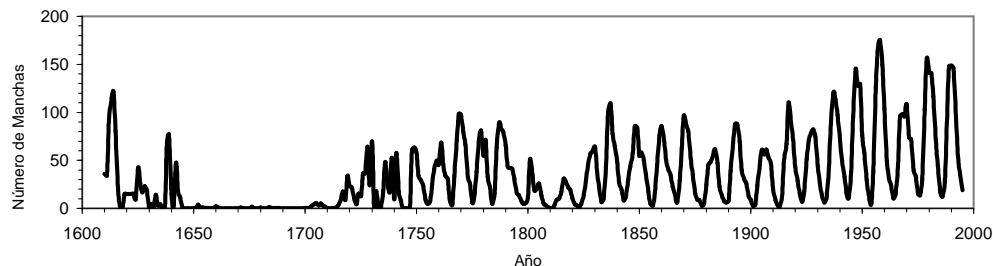


Figura 2.2: Serie de tiempo del número de manchas solares desde 1600, datos de <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html>.

Edad de Hielo. Aunque la anterior coincidencia requiere más elaboración, no deja de ser una indicación interesante.

Por otro lado, la termosfera está claramente influida por los ciclos solares. Su temperatura media puede variar de 750 K en épocas de mínimo en las manchas solares, a casi 1500 K durante los máximos. Por lo tanto la composición media en esa capa y la densidad cambian drásticamente. Además, estas propiedades se ven afectadas por los eventos solares transitorios, que pueden incrementarlas en factores de casi dos [Volland, 1988; pág. 224]. Las primeras evidencias de esto vienen de los comienzos de la era satelital, cuando de la manera más dura (por la pérdida de satélites) se observó el incremento de la fricción en la atmósfera.

Evidencia reciente encuentra también la señal de los ciclos solares en las series de temperaturas oceánicas y de precipitación [Labitzke and Loon, 1992]. No hay acuerdo acerca de los mecanismos físicos para que esa señal alcance a ser apreciable en los registros climáticos. Parece que es necesario un factor de amplificación, que algunos han ubicado en los efectos sobre las cargas eléctricas de los núcleos de condensación [Tinsley, 1996]. Todo esto es aún objeto de discusión [Lean, 2005], pero la teoría estándar sigue considerando que la cantidad de energía que el Sol emite ha sido, es y seguirá siendo constante en un horizonte de tiempo suficiente como para estudiar nuestro clima presente, en el cuaternario y en el futuro próximo.

2.1.2. La Atmósfera

La atmósfera es la componente más dinámica y cambiante del sistema climático. Sus componentes interactúan con la radiación solar y la radiación emitida por la superficie, reflejan y absorben dichas radiaciones. Esta función es dependiente de la composición. Además el aire fluye y por tanto transporta calor, constituyentes, intercambia con la superficie sustancias como el agua, el CO₂

y muchas más componentes menores. También intercambia con la superficie energía y momentum. Por ejemplo, la fricción entre el viento y la superficie del mar es factor fundamental para las corrientes oceánicas. Por su movilidad, la atmósfera es fundamental medio de distribución de energía en el sistema climático.

Hay mucho por explicar acerca de la evolución de la atmósfera terrestre. En particular parece que su composición primaria era mucho más rica en gases nobles, en concordancia con el material proto-planetario. Algún mecanismo asociado al viento solar o a un impacto externo hizo que se perdiera esta atmósfera primaria.

Las diferentes substancias que componen la atmósfera tienen propiedades ópticas que afectan el balance energético a diferentes longitudes de onda. Es decir, son más o menos transparentes a la radiación, en función de su tamaño y su estructura molecular. Como resultado de la existencia de atmósfera con sus determinadas propiedades ópticas, la superficie de la Tierra alcanza temperaturas mayores que las que hipotéticamente tendría si careciera de esta capa gaseosa. Este es el famoso efecto invernadero. En su versión más simple resulta de transparencia relativa de la atmósfera a la radiación solar, que es de longitud de onda corta, y que por tanto en buena medida penetra hasta la superficie. La superficie absorbe la radiación, se calienta y emite a su vez como cuerpo negro, a menor temperatura que el Sol y por lo tanto a mayor longitud de onda. En contraste, la atmósfera es más impermeable al calor radiante de la superficie, que es absorbido por algunos de sus componentes. La atmósfera a su vez emite tanto hacia el espacio exterior como hacia la superficie. El resultado es una superficie más caliente que la que se tendría si no hubiera atmósfera.

Adicionalmente, algunas de las componentes de la atmósfera son activas químicamente. También por su tamaño, hay aerosoles y pequeñas partículas que pueden servir de núcleos de condensación para la formación de la lluvia. La atmósfera además es un fluido de relativamente buena capacidad térmica, lo que resulta en un mecanismo de distribución de energía suficientemente rápido para que los contrastes de temperatura entre los sitios que reciben diferentes cantidades de radiación.

La composición actual de la atmósfera terrestre incluye: nitrógeno molecular, N_2 , un gas muy estable químicamente con una participación del 78,08 % por volumen de aire seco; oxígeno, también en forma molecular, O_2 , un gas crucial para la vida sobre el planeta, que es consumido y producido en condiciones normales por diversos procesos pero que en el presente se mantiene constante con una participación del 20,95 % por volumen del aire seco; prácticamente el resto del aire seco lo constituye el argón, Ar, un gas noble prácticamente inerte, con una participación del 0,934 % por volumen del aire seco. Con participación que se mide en ppm está el dióxido de carbono, CO_2 , con una concentración

de 353 ppm y que tiene una influencia muy importante en el clima como gas de invernadero, en los procesos biofísicos por su papel en la fotosíntesis como ingrediente y de la respiración como producto, y en la actividad humana por ser subproducto de la quema de combustibles y por tanto del aprovechamiento energético.

Otros constituyentes menores son neón (Ne, 18 ppm), krypton (Kr, 1 ppm), helio (He, 5 ppm), metano (CH_4 , 1,7 ppm), xenón (Xe, 0,09 ppm, ozono (O_3 , 0,0 a 0,09 ppm), óxido de nitrógeno (N_2O , 0,31 ppm), monóxido de carbono (CO , 0,12 ppm), hidrógeno molecular (H_2 , 0,5 ppm), amoníaco (NH_3 , 0,1 ppm), dióxido de nitrógeno (NO_2 , 0,001 ppm) y trazas con concentraciones todavía tres órdenes de magnitud menor como dióxido de azufre (SO_2), sulfato de hidrógeno (H_2S), y compuestos cloro-fluorocarbonados (CCL_2F_2 , CCl_2F).

También contiene la atmósfera cantidades variables de aerosoles, sólidos muy pequeños que provienen de la superficie y se intercambian con ella de manera permanente, por ejemplo por erupciones volcánicas, incendios, polvo, lluvia, actividad biológica. Estos aerosoles también tienen propiedades ópticas importantes y sirven de núcleo de condensación para la lluvia. Los constituyentes menores tienen efectos climáticos y ambientales importantes con relación al efecto invernadero, las reacciones químicas en las que están involucrados el ozono, los aerosoles núcleos de condensación de la lluvia y la contaminación ambiental resultado de actividades humanas.

Como se advirtió, la anterior composición se refiere al aire seco. En general, en la atmósfera de manera variable hay agua en los tres estados. En forma de vapor, juega el más importante papel como gas invernadero y proviene de la evaporación del agua líquida desde los mares, otros cuerpos de agua continentales, ríos y suelos o de la sublimación de nieve o hielo. En zonas y días húmedos puede alcanzar relaciones de mezcla de hasta 0,020 kg de vapor de agua por kg de aire seco y valores bastante menores en sitios y o días secos. En forma líquida hay agua en las nubes en muchos otros lugares de la atmósfera con suficiente humedad y temperatura para que el vapor de agua se condense, algunas veces en gotas de tamaños menores que no son visibles a simple vista, otras un poco mayores para formar la llamada neblina. En zonas muy frías, en nubes en la parte más alta de la troposfera por ejemplo, hay agua en estado sólido en forma de nieve o granizo. La cantidad de agua que puede tener una nube es muy variable, dependiendo de su tipo y de su desarrollo vertical.

Las propiedades ópticas de las nubes pueden afectar la capacidad de reflejar luz solar de la atmósfera, propiedad que se cuantifica mediante el albedo. El efecto de las nubes sobre la temperatura de la superficie es por lo tanto mezclado. Por su papel de invernadero, el vapor y las gotas de agua calientan la superficie. Pero por el aumento del albedo, su efecto es en el sentido de enfriar, pues disminuye la cantidad de radiación solar que pasa hasta la superficie.

Después del agua, el CO_2 es el siguiente constituyente en importancia respecto al efecto invernadero. En el pasado geológico se ha detectado que en los períodos glaciales había menor concentración, mientras que en los períodos interglaciales era mayor. Su papel en la fotosíntesis, su equilibrio con el océano y la litosfera y el hecho de que el carbono sea elemento clave de la composición de los seres vivos indica que su estudio merece mayor cuidado. Además, en la era moderna, por la quema de combustibles fósiles, el hombre está aumentando su concentración, lo cual lleva a un calentamiento de la superficie y a una perturbación mayor del clima. Lo que ha llevado a que se acuñe el término de cambio climático. Tema que se profundiza en el capítulo siguiente.

La actual composición se formó mediante degasificación de la Tierra sólida. No había pues atmósfera en alguna época según esta teoría. El vapor de agua se condensó para formar los mares porque la distancia al Sol y la temperatura de equilibrio radiativo de la Tierra sin atmósfera así lo permitían. El CO_2 se equilibró con las rocas carbonadas y se disolvió en el mar. El oxígeno apareció por la fotosíntesis de las plantas. Algunas teorías [Frank and Sigwarth, 1993] consideran como fuente de agua terrestre el continuo bombardeo de pequeños cometas de núcleo de hielo.

La presión atmosférica obedece como primera aproximación la llamada ley hidrostática, que significa que la presión en un punto cualquiera es igual al peso de la columna de aire de área unitaria por encima de dicho punto. Esta ley es válida también para el caso del agua, donde implica un aumento lineal de la presión con la profundidad, por ser el agua prácticamente incompresible. Para la atmósfera, la ley es exponencial porque la densidad cambia con la presión de acuerdo con la ley de gases. Esta ley, que es válida para el aire en su conjunto como mezcla, también se cumple para la presión parcial de cada uno de los constituyentes, con una tasa proporcional a su densidad. Por tal razón los constituyentes más ligeros (helio e hidrógeno) predominan a las mayores alturas.

La atmósfera se descompone en capas concéntricas según sus propiedades. Ver esquema en la Figura 2.3. La capa inferior, más cercana a la superficie y que va hasta unos 10 km se conoce con el nombre de troposfera. Nombre que significa que está en movimiento y por tanto el aire que la compone está bien mezclado. En esta capa la temperatura disminuye con la altura a una tasa aproximada de $6,5^\circ\text{C}/\text{km}$. Este descenso se explica por el balance energético entre el enfriamiento radiativo, el transporte de calor desde la superficie por convección, y la energía interna requerida por la expansión resultante de la disminución de presión con la altura. La cercanía o lejanía del Sol o del centro de la Tierra nada tienen que ver con este fenómeno. Esta tasa es importante para la sensibilidad del clima ante cambios climáticos naturales o antropogénicos.

El límite de la troposfera se conoce como la tropopausa. A partir de allí em-

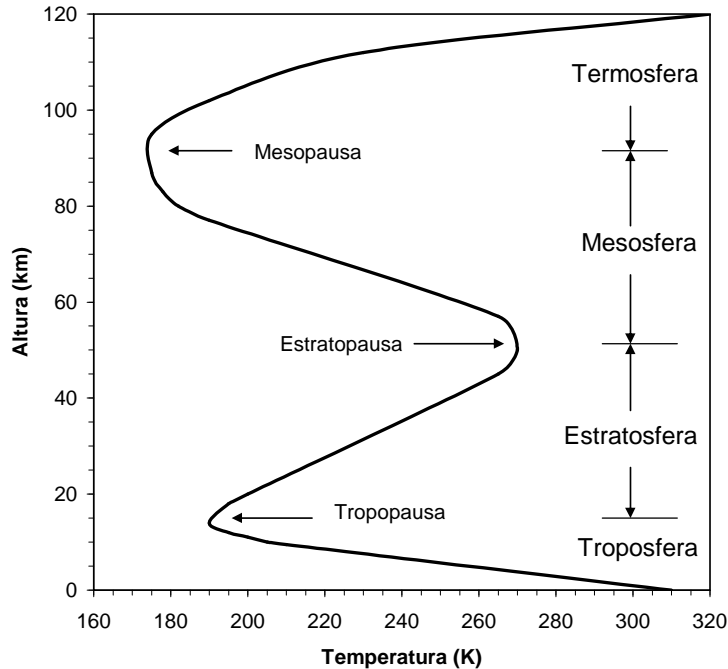


Figura 2.3: Principales capas de la atmósfera definidas de acuerdo con un perfil promedio de temperatura.

pieza la estratosfera, que llega hasta a unos 50 km de altura. En esta capa la temperatura aumenta con la altura debido a la absorción de radiación solar por el ozono. Como resultado de esta estructura térmica se conforman capas o estratos que no se mezclan, con muy poco o ningún movimiento vertical. Puesto que las capas más frías y por tanto densas están por debajo de capas más calientes y ligeras. De allí su nombre.

Desde el límite superior de la estratosfera, la estratopausa, a unos 50 km de altura, hasta la mesopausa, aproximadamente a unos 90 km, está la mesoesfera o capa intermedia. En ella la temperatura nuevamente disminuye con la altura. Por último está la termosfera, que va hasta a unos 120 km, allí la temperatura aumenta con la altura por la absorción radiación ultravioleta y la consecuente ionización de las moléculas de oxígeno y nitrógeno.

2.1.3. La Hidrosfera

Se estima que la Tierra tiene un volumen total de $1,386 \times 10^9 \text{ km}^3$ de agua, contenida en los océanos, glaciares, acuíferos o depósitos subterráneos, lagos y ríos, y suelos. La atmósfera tiene el 0,001 % del total. El agua está presen-

te en todos los estados y fluye permanentemente entre estos depósitos. Este continuo movimiento se conoce como ciclo hidrológico. A la atmósfera llega agua por evaporación desde toda la superficie del planeta. Esta evaporación es balanceada en el largo plazo por la precipitación de una cantidad igual en forma de lluvia o nieve. De los continentes fluye hacia los mares por los ríos. Sin embargo, la distribución espacial y temporal de estos flujos es bastante irregular, lo que da lugar a temporadas lluviosas y secas, a desiertos y a selvas super húmedas y todos los grados intermedios. En sí, por su papel para la vida, la disponibilidad y el eventual exceso de agua es uno de los componentes más importantes del clima, de su variabilidad y cambio. Además, por sus extraordinarias propiedades físicas y químicas cumple un papel fundamental en el clima terrestre, la forma de la superficie y en la biosfera.

El agua líquida tiene un calor específico de $4218 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, mayor que la mayoría de las sustancias naturales presentes en la Tierra. Los océanos como consecuencia tienen una capacidad de absorber enormes cantidades de energía del Sol. Por ser transparente esta energía penetra a profundidades suficientes para que prácticamente casi la totalidad de esta energía se absorba. El albedo del océano es el más bajo de todas las superficies del planeta, con valores promedio del orden de 0,10, y de hasta de 0,05 para viento en calma. Esta energía absorbida por el mar puede ser liberada en otros momentos o transportada a otros lugares. Por su capacidad de fluir, el océano contribuye al transporte de energía de las zonas tropicales hacia las polares de manera comparable a la atmósfera.

Como el punto triple de su diagrama de fases está cerca a las condiciones de presión y temperatura predominantes en la Tierra, el agua no sólo está presente en todos los estados, sino que constantemente cambia de uno a otro y al hacerlo tiene consecuencias energéticas y por tanto climáticas muy importantes. El flujo de calor latente de evaporación desde la superficie a la atmósfera es uno de los principales mecanismos de transporte de energía y formación del equilibrio térmico terrestre. Aproximadamente el 24% del total de la energía solar que llega a la superficie se transporta a la atmósfera en forma de calor latente. El calor latente del agua es de los mayores entre todas las sustancias ($2,5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$). Para dar una idea de la magnitud, evaporar una lámina de un metro, valor cercano al promedio anual de algunos sitios de Colombia, se requieren 694 kWh m^{-2} . Para evaporar tal cantidad en un área de 100 m^2 se requiere 20 veces más energía que el consumo normal de una familia, cuya casa ocupa aproximadamente esa área. Esta energía proviene del Sol. El efecto de la evaporación es un enfriamiento de la superficie. En la troposfera media y alta, con la condensación del vapor de agua se libera el calor latente. Por esta vía se transfiere a la atmósfera una cantidad importante de energía que alimenta la circulación y la redistribución horizontal de energía.

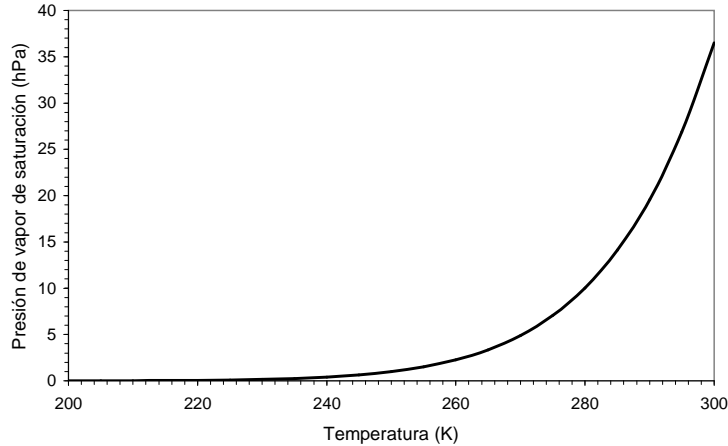


Figura 2.4: Ecuación de Clausius-Clapeyron, $e_s = e_0 \exp \left\{ \frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$, para la presión de vapor de saturación del agua e_s , en función de la temperatura T . L es el calor latente de evaporación y R_v es la constante de gases para el vapor de agua.

La presión de vapor de saturación, la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener el aire, es una función exponencial de la temperatura, conocida con el nombre de la ecuación de Clausius-Clapeyron que se ilustra en la Figura 2.4. Con esta ecuación se puede explicar por qué el enfriamiento del aire húmedo produce condensación del vapor, asunto relevante para la producción de precipitación. La dependencia exponencial de la temperatura introduce una dependencia no lineal importante que liga la atmósfera con el océano y la superficie, a través del papel de los cambios de fase en el ciclo hidrológico.

El hielo está presente en las zonas polares continentales y marinas, en las altas montañas, en la época de invierno y/o los máximos de la época glacial en las latitudes medias y altas. El hielo tiene un albedo muy alto (entre 0,4 y 0,9, con valores típicos de 0,85) lo cual retroalimenta positivamente con los cambios climáticos: a mayor enfriamiento aumenta la cobertura de nieve y hielo, lo cual aumenta el albedo de la superficie, disminuye la radiación solar absorbida y refuerza positivamente el enfriamiento. Sobre mar, la formación de hielo no sólo significa un cambio en el albedo de 0,10 a 0,85 sino también la formación de una capa que aísla las aguas relativamente más cálidas (4°C) de la atmósfera que tiene temperaturas muy inferiores a cero en invierno. El hielo marino también prácticamente aísla la atmósfera de la fuente de humedad.

Los hielos marinos hacen parte de un proceso muy dinámico de crecimiento, ablación, arrastre, deformaciones y fracturas que tienen importantes impli-

caciones en el sistema climático. El hielo marino ocupa aproximadamente el 7 % de la superficie terrestre, con una gran variabilidad estacional. Algunos de témpanos duran sólo una estación, otros pueden estabilizarse durante varios años con crecimiento en su capa inferior en invierno y ablación de la capa superior en verano. Los témpanos de varios años pueden tener unas 20 capas anuales y un espesor del orden de 4 m. Las dimensiones verticales máximas pueden llegar a ser de hasta 47 m sumergido y 13 m a flote. Los témpanos nuevos pueden ser de unos cuantos centímetros de espesor y alcanzar al final del invierno hasta 3 m. En el hemisferio boreal, el Océano Ártico está prácticamente encerrado por tierra y el hielo marino no puede ser arrastrado hacia mar abierto al sur, mientras que el Océano Antártico es abierto y el hielo es arrastrado grandes distancias hacia el norte. En el hemisferio norte el área cubierta por hielo marino en cualquier época es del orden de $8 \times 10^6 \text{ km}^2$ con un máximo en invierno de $15 \times 10^6 \text{ km}^2$ mientras que en el hemisferio austral los valores correspondientes son $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ y $20 \times 10^6 \text{ km}^2$. La explicación de las diferencias está en la circunstancia geográfica ya descrita y en las diferencias en la circulación. Estas áreas corresponden a muchos témpanos de muy diversos tamaños y no a una capa uniforme. Esto debido al arrastre, las deformaciones y grietas. Aunque en invierno, en una región del océano en las zonas polares puede haber hasta un 98 % de hielo, el 2 % restante cubierto por grietas, capas muy delgadas de hielo o aguas abiertas es muy importante desde el punto de vista climático porque allí el flujo de calor por unidad de área es hasta 200 veces mayor que a través de hielo.

La formación de hielo marino también tiene efectos importantes en la salinidad. La congelación es equivalente a una destilación que produce una componente menos salina, el hielo, y una salmuera más salina y rica en gases disueltos, en particular CO_2 . El hielo marino recién formado tiene una salinidad de un tercio de la salinidad original por la presencia de intrusiones salinas, inicialmente en estado líquido. Estas intrusiones determinan en gran medida las propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas del hielo. Con el tiempo y la disminución de la temperatura, estas intrusiones disminuyen de volumen por drenaje y pueden incluso dar origen a hidratos salinos sólidos. En este proceso la salinidad del hielo disminuye y puede alcanzar valores comparables a los del agua dulce en las partes aéreas de los témpanos de varios años. La salmuera es más densa y por lo tanto tiende a hundirse y contribuye a la formación de aguas profundas. Éste efecto sobre el CO_2 es importante en el largo plazo y da origen a un “bombeo salino” que extrae CO_2 de la atmósfera y lo lleva a las profundidades del océano.

El vapor de agua es el principal gas de efecto invernadero (ver Sección 2.2.2). En conjunto con el CO_2 , el metano y otros gases en menor concentración, juega por tanto un papel fundamental en la distribución de la energía radiativa en

el sistema climático.

La precipitación mueve el ciclo hidrológico continental y es factor primordial para la determinación de la salinidad de los océanos. La cantidad de precipitación es una medida de la liberación de calor latente en la atmósfera. La precipitación también afecta la composición atmosférica mediante el transporte y remoción de aerosoles y gases solubles. Las gotas de agua son además lugar para varias reacciones químicas.

El agua es un solvente universal que disuelve prácticamente todas las sustancias presentes en el corteza terrestre y la biosfera. Por lo tanto la lluvia, las corrientes superficiales y el agua presente en el interior de los suelos y los seres vivos están constantemente transportando sustancias químicas, subproductos de reacciones, nutrientes, desechos. Contribuye a la descomposición de las rocas, a la formación de los suelos, a la acumulación de sales en el mar, al flujo del carbono, del nitrógeno, de los compuestos necesarios para la vida. La composición del océano y los ciclos de todas las sustancias que controlan el clima a la escala geológica están regidos por el ciclo hidrológico.

La forma de la superficie de la Tierra es labrada por el agua, dando origen a planicies, valles, laderas y contribuyendo a la formación de las montañas por el efecto indirecto de la isostacia.

El agua participa directa e indirectamente en la fotosíntesis, la reacción química más importante que ocurre en la Tierra, base de toda las cadenas tróficas. El tejido vegetal sintetizado en esta reacción, tiene como ingredientes además de la luz solar, el dióxido de carbono y el agua. Por otro lado, la transpiración de las plantas, evaporación de agua desde el suelo hacia la atmósfera a través de las raíces, vasos y hojas, juega un papel importante en la fotosíntesis para el balance térmico mediante enfriamiento. De esta manera, grandes cantidades de agua son necesarias para el desarrollo de la vegetación.

El papel del océano en los ciclos biogeoquímicos del oxígeno, el carbono, el nitrógeno, el fósforo y en general de todos los elementos es fundamental. En el largo plazo estos ciclos tienen un impacto significativo sobre el clima terrestre como se verá en mayor detalle en la sección correspondiente al ciclo del carbono.

La Tierra tiene aproximadamente unos $1\,386 \times 10^6 \text{ km}^3$ de agua, casi toda en los mares ($1\,348 \times 10^6 \text{ km}^3$), el 97,39%. Casi todo el resto está en glaciares polares ($22,78 \times 10^6 \text{ km}^3$). Del resto, casi toda está en los suelos y depósitos subterráneos ($8,062 \times 10^6 \text{ km}^3$). El 0,6% restante está en ríos, lagos y la atmósfera. Esta última tiene un estimado de $0,013 \times 10^6 \text{ km}^3$. Los hidrólogos acostumbran expresar las cantidades de agua dividiendo el volumen por el área horizontal del depósito correspondiente, así se obtiene un longitud, que se puede interpretar como la altura media que alcanzaría la lámina de agua distribuida uniformemente sobre tal área. Para el océano esta altura corresponde aproximadamente a 3 700 m, y para la atmósfera a 0,025 m.

El agua está en continua circulación en el ciclo hidrológico. De los océanos fluye hacia la atmósfera por evaporación un equivalente a una lámina de 1 180 mm de altura cada año. De los continentes también hay evaporación y transpiración a través de las plantas en una cantidad estimada de 480 mm por año. La atmósfera retorna a la superficie en forma de precipitación una cantidad suficiente para equilibrar los flujos. Sobre el mar caen unos 1 070 mm y sobre continentes 750 mm. En ambos casos expresados con relación al área oceánica y continental respectivamente. Para balancear los flujos entre el continente y el mar está el caudal o esorrentía que transportan los ríos, que se estima en un equivalente de 270 mm si se expresan con respecto al área continental o 110 mm si se expresan respecto al área oceánica. Es claro que una cantidad equivalente de origen oceánico se transporta atmosféricamente a los continentes para alimentar el exceso de precipitación sobre evaporación que allí se presenta. Estas estimaciones corresponden a valores promedio; en años particulares o en períodos de tiempo más cortos pueden haber cambios y desbalances en estos flujos a costa de incrementos o disminuciones en los almacenamientos. De manera semejante se presenta variabilidad espacial. Hay zonas con mucha mayor precipitación, hasta 8000 mm por año (Chocó en la costa Pacífica colombiana) y sitios muy secos, casi sin precipitación.

2.1.4. La Biosfera

La biosfera tiene importancia climática que va desde su papel en la química atmosférica como uno de los factores principales que determinan la composición de la atmósfera, con todas sus consecuencias en el balance de radiación, pasando por el cambio en el albedo, su papel en la circulación del agua mediante la evapotranspiración, su efecto sobre los vientos al cambiar la rugosidad en la capa límite, su papel en la protección de la erosión por la cobertura vegetal. Algunos argumentan que su importancia es bastante más significativa y proponen la hipótesis de Gaia en la que se le da un papel más preponderante a la vida en el planeta [Lovelock, 1979; Margulis and Lovelock, 1976].

De hecho, la composición de la atmósfera terrestre actual es muy diferente de la que se obtendría por mero equilibrio físico-químico. El papel de la vida en la evolución del planeta merece ser mirado detenidamente. Por ejemplo, se sabe que la fotosíntesis es responsable de la existencia de oxígeno en la atmósfera y que el bióxido de carbono es bastante menos abundante de lo que la físico-química sola indicaría. Si súbitamente se extinguiera la vida su concentración aumentaría 30 veces. Grandes cantidades de carbono están almacenadas en los organismos vivientes. Además, si no fuera por el reemplazo continuo por actividades bióticas los gases más livianos como el hidrógeno y el metano dejarían de existir en la atmósfera en una cuantas décadas.

La atmósfera inicial no tenía oxígeno. La única explicación de la concentración actual que resiste pruebas de consistencia y concuerda con la evidencia disponible es la de su producción por la fotosíntesis. Se sabe que ésta se inició hace aproximadamente dos mil quinientos millones de años. Hay registro de que antes de eso en los orígenes de la Tierra, el oxígeno existente se combinó con minerales para formar óxidos. La evidencia geológica también sugiere que en los últimos mil millones de años los niveles de oxígeno no han cambiado mucho respecto al valor actual. Además, concentraciones mayores que la actual producirían incendios de manera espontánea. Un posible mecanismo para explicar la estabilización de la concentración de oxígeno en la atmósfera es la producción biológica de metano por bacterias. El metano tiene una vida corta y se puede combinar con oxígeno para producir CO_2 y por lo tanto estabiliza la concentración de oxígeno.

Esta teoría también es una de las posibles soluciones del acertijo del clima en la época del débil Sol joven, cuando el clima no era glacial por efecto invernadero. Según ella, la biosfera fue un factor fundamental para reducir los altos niveles originales de CO_2 en la atmósfera hasta los niveles actuales mediante dos mecanismos: el bombeo biológico en el mar y la aceleración de la meteorización de las rocas. El primero se refiere a la fijación de carbono atmosférico en los mares por el plancton, organismos fotosintéticos, y su posterior exportación al fondo. El segundo tiene que ver con la aceleración de la meteorización química de las rocas, que secuestra CO_2 , por efectos de los seres vivos [Lovelock, 1979; Margulis and Lovelock, 1976].

En efecto, la expansión de la vegetación caducifolia angiosperma durante la era cenozoica está bien documentada y aporta evidencia a favor de la hipótesis sobre la importancia de la vida en el sistema climático. En contraste con las coníferas siempre verdes, esta vegetación remueve del suelo cationes de calcio, potasio y magnesio a tasas tres a cuatro veces mayores, fundamentalmente por la descomposición de la hojarasca. En consecuencia se aumenta la meteorización. Durante este período, esta vegetación se expandió desde su origen en las latitudes subpolares del Hemisferio Norte hasta las latitudes medias. Se estima que esta expansión puede haber consumido suficiente CO_2 como para haber enfriado el clima global hasta en unos 10°C [Volk, 1989]. Como consecuencia del enfriamiento la estacionalidad aumentó. De esto algunos concluyen que los árboles caducifolios son un factor para la intensificación de la estacionalidad y por tanto favorecieron su propia expansión [Bloom, 1998; pág. 51].

Sabemos que el mar es salado por la acumulación en el tiempo de los subproductos de la meteorización química de las rocas que son transportadas por los ríos desde los continentes debido al lavado resultante del ciclo hidrológico. Sin embargo lo que no sabemos muy bien es por qué el mar tiene la salinidad que tiene y no otra mayor. En la polémica entre el creacionismo y el evolucionismo

de fines del siglo XIX sobre la edad de la Tierra, John Joly (1857–1933) calculó en 100 millones de años la antigüedad del océano con base en su volumen, la cantidad de sodio que contiene y su tasa de transporte en solución por los ríos [Burchfield, 1990; pág. 147]. Este valor tan bajo muestra claramente que en tal cálculo hace falta considerar otros procesos para estabilizar la salinidad del mar a los valores que hoy observamos.

Éste es otro ejemplo de la importancia climática de la biosfera. Se ha avanzado en la comprensión del papel de compuestos de azufre y yodo en el mar y la atmósfera en el necesario flujo de retorno del océano hacia los continentes. En tal flujo los seres vivos juegan un papel para cerrar el ciclo mediante la biosíntesis de dimetilo de azufre (DMS), metilo de yodo y disulfuro de carbono. Los microorganismos hacen tal cosa porque el mar es muy salado para la vida, pues su salinidad está muy cerca del límite superior de tolerancia. Los peces, mamíferos y demás organismos marinos mayores tienen su salinidad interna cerca a una molaridad de 0,16, la misma que los animales y plantas terrestres. Esto se logra por el bombeo diferencial de agua y sales. Pero la inmensa relación área superficial a volumen en las algas microscópicas hacen tal estrategia energéticamente imposible y por lo tanto desarrollaron una estrategia totalmente diferente. Las algas microscópicas sintetizan sales con carga iónica neutra, cuya presencia en el interior de las células balancea la alta presión osmótica del océano sin incrementar la resistencia iónica interna hasta niveles tóxicos. El compuesto más común que cumple tal propósito es el propionato de dimetilsulfonio (DMSP), una molécula simple, con una carga positiva en un extremo y negativa en el otro. Cuando las algas mueren, el compuesto se libera al océano, donde se descompone en ácido acrílico y dimetilo de azufre (DMS), de donde vuelve al continente vía la atmósfera. Hoy se sabe que tales compuestos son importantes para la formación de aerosoles y núcleos de condensación.

Actualmente hay poco conocimiento desarrollado sobre el efecto climático de estos compuestos, su influencia en el albedo y sobre todo en las nubes. La existencia de cadenas de retroalimentación entre la cantidad de radiación solar que llega a la superficie del mar, la temperatura de este, la actividad fotosintética y la liberación de estos compuestos a la atmósfera es una posibilidad a considerar [Lovelock, 1979].

Algunos han llegado a afirmar que la vida regula el clima y la composición química de la atmósfera y del mar a un punto óptimo para ella misma. En la discusión el argumento se ha refinado hasta afirmar que el sistema completo de la vida y su ambiente material es un sistema autorregulado a un estado confortable para los organismos. Se argumenta que la existencia de mecanismos de retroalimentación, resultantes de la competencia y evolución de las especies, puede aportar tal regulación. Sin embargo, hay lugar a discusiones sobre la

estabilidad del sistema geofísico, teniendo en cuenta la inestabilidad inherente a los sistemas caóticos deterministas, estudiados por la teoría del caos.

Una gama de hipótesis de la teoría Gaia según Kirchner [1991] es la siguiente, enunciadas de la más débil a la más fuerte y por tanto de la más aceptada y con mayor evidencia a su favor, a la que se mira con más escepticismo y tiene más elementos especulativos:

- **Influencia.** La biosfera tiene una influencia substancial sobre ciertos aspectos del mundo abiótico, incluyendo el clima.
- **Co-evolución.** La biosfera influye sobre el ambiente abiótico y éste influye sobre la evolución de la biota a través de mecanismos darwinianos de selección del más adaptado.
- **Homeostasis.** Las relaciones mutuas entre la biota y el ambiente están caracterizadas por cadenas de retroalimentación que incluyen componentes negativas que producen estabilidad.
- **Teleológica.** La atmósfera se mantiene en equilibrio homeostático no sólo por la biosfera sino en un cierto sentido para la biosfera.
- **Optimalidad.** La biota manipula su ambiente con el propósito de crear condiciones favorables para sí misma.

2.1.5. La Litosfera

Los continentes representan apenas un 30 % de la superficie del planeta. Allí vivimos, de ellos obtenemos la mayor parte de la alimentación y demás materiales útiles. La temperatura sobre tierra firme y la humedad del suelo son los factores principales que controlan la vegetación.

El albedo de la litosfera depende inversamente de la densidad de la cobertura vegetal, pero aun con la más alta y densa vegetación es superior al del mar. El calor absorbido fluye hacia su interior sólo mediante conducción, un mecanismo bastante menos eficiente que la convección posible en las capas fluidas. La capacidad de la tierra para almacenar calor también es menor que la del agua, es decir tiene un calor específico menor, En consecuencia se enfría y calienta mucho más rápido que el mar. Estos tres factores producen calentamientos diferenciales entre el mar y los continentes que inducen circulación predominante. Este mecanismo explica las brisas marinas a escala diaria, los monzones a escala estacional, la diferencia entre el Hemisferio Norte y el Sur, por la muy desigual distribución de los continentes, ver Figura 2.5.

La topografía también tiene efectos sobre la circulación atmosférica, produce zonas de sombra de lluvias, bloqueos de presión, controles de las llamadas ondas planetarias y de la posición e intensidad de los chorros, vientos ascendentes y descendentes, aumento de la fricción, etc. Por ejemplo, el papel del Himalaya

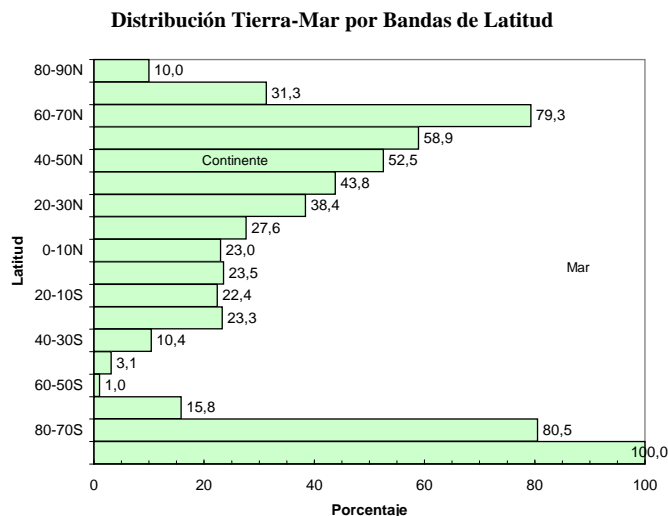


Figura 2.5: Distribución entre mar y continentes por bandas latitudinales.

en el monzón hindú es fundamental para producir el ascenso orográfico de los vientos que descargan grandes lluvias en los períodos de verano.

La distribución de los continentes contribuye al establecimiento de los actuales gradientes latitudinales de temperatura y es un factor a considerar para explicar los períodos glaciales. La circulación oceánica está controlada por las barreras continentales, la existencia de estrechos y sus posibles cierres debido al movimiento de las placas tectónicas. En el pasado geológico por ejemplo existía el denominado mar de Tétis, que circundaba el globo en las latitudes bajas, y el clima era muy diferente al actual.

El efecto de la topografía sobre el movimiento del agua es también fundamental, pues determina su concentración en ríos y corrientes. A su vez, el clima (hidrología) es un factor en la formación de la topografía, por su efecto erosivo.

Los aerosoles producto de las erupciones volcánicas tienen efectos importantes en el clima terrestre: la parte baja de la atmósfera y la superficie terrestre experimentan una pérdida neta de radiación solar incidente por aumento de la dispersión hacia atrás (lo que aumenta el albedo) y redistribuye la absorción de radiación; en la estratosfera baja, la atmósfera se calienta por absorción de radiación de onda larga de la troposfera y la superficie. También se producen cambios en la microfísica de las nubes, la química de la lluvia, las tormentas eléctricas y en la convección profunda como resultado de la abundancia de núcleos de condensación. Estos aerosoles tienen a su vez un impacto severo sobre la química de la estratosfera, en particular sobre el ozono y el CO₂. En

el largo plazo geológico las emisiones volcánicas son factor fundamental para determinar la composición de la atmósfera.

Con el levantamiento orogénico se acelera la erosión. Más rocas y fragmentos de roca se exponen a la meteorización. Como se verá más adelante, la meteorización química de las rocas consume CO_2 atmosférico y por lo tanto contribuye a la disminución del efecto invernadero o sea al enfriamiento. Estos procesos parece han jugado un papel importante en los ciclos de glaciaciones durante el período Cenozoico.

2.2. Balance Global de Energía

Para mejorar la comprensión de algunos fenómenos importantes, se presentará de manera gradual modelos cada vez más complejos.

2.2.1. Balance de Radiación Simple

Un primer modelo casi trivial del balance energético radiativo se obtiene considerando la Tierra como un punto sin atmósfera, que recibe la radiación solar S_0 , refleja con un albedo α igual al promedio de toda la Tierra que se estima en 0,30. En este modelo, la Tierra absorbe como un cuerpo negro y emite de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann a una temperatura de emisión T_e . Aplicando el balance se obtiene

$$(1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 = 0. \quad (2.1)$$

El factor de 1/4 se debe a la relación que hay entre el área de un círculo y el área superficial de una esfera del mismo diámetro. S_0 se define por unidad de área perpendicular a los rayos y la Tierra emite por toda su superficie. Despejando y usando los valores consignados en la Sección 2.1.1 se obtiene $T_e = 255 \text{ K} = -18^\circ\text{C}$. Este valor es menor que la temperatura media observada de $288 \text{ K} = +15^\circ\text{C}$. Para entender la diferencia es necesario considerar el efecto de la atmósfera y en particular de los gases de efecto invernadero.

2.2.2. Efecto Invernadero

De acuerdo a la ley de Wien, el espectro de emisión tiene un máximo a una longitud de onda inversamente proporcional a la temperatura del cuerpo que emite. En consecuencia la Tierra emite a longitudes de onda correspondientes al calor radiante (5 a $80 \mu\text{m}$) mientras que el Sol emite luz visible (0,4 a $5 \mu\text{m}$).

En el panel superior de la Figura 2.6 se presenta un esquema de ambos espectros. Los diferentes gases constituyentes de la atmósfera tienen propiedades

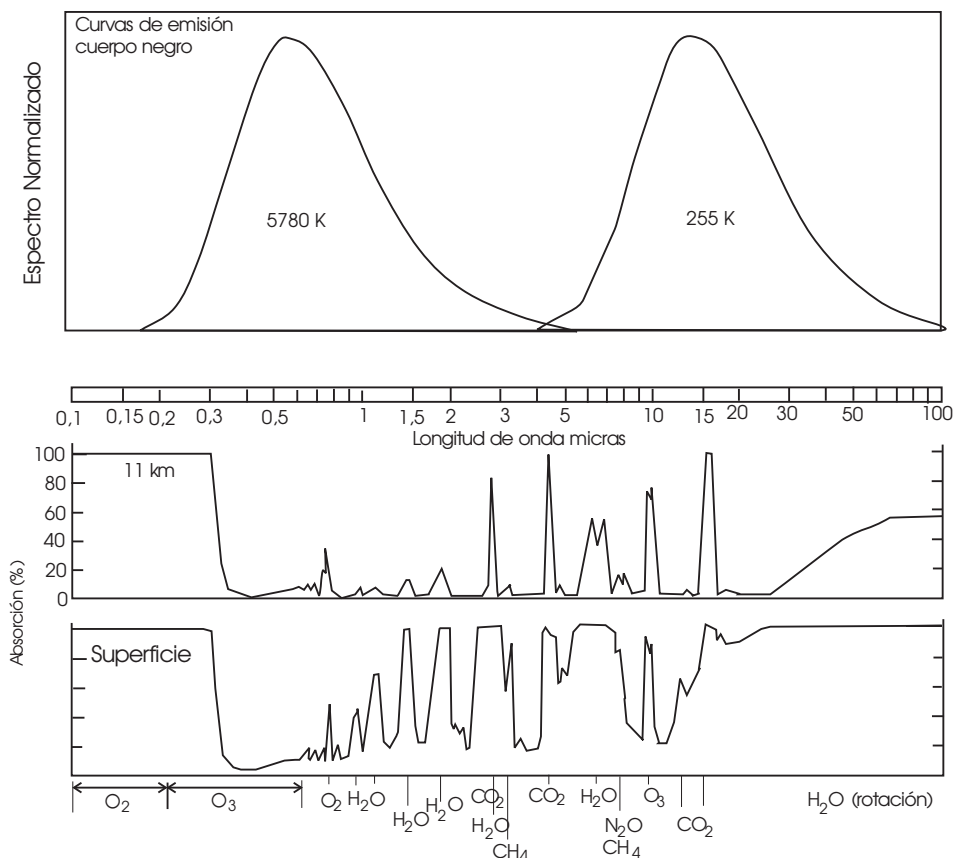


Figura 2.6: (Panel superior) Espectro normalizado de la radiación emitida por el Sol y la Tierra en función de la longitud de onda. (Panel intermedio) La fracción de la radiación absorbida mientras pasa por la atmósfera entre los 11 km y el tope en función de la longitud de onda. (Panel inferior) Semejante al anterior panel pero para toda la atmósfera completa. Se indican las moléculas que contribuyen a la absorción. Adaptada de Hartmann [1994].

radiativas que dependen del tamaño, forma y estructura de sus moléculas, de acuerdo a avanzada teoría de la mecánica cuántica. En particular las moléculas con más de dos átomos dan origen a capacidad de absorción importante por rotación. En la Figura 2.6 se presenta en el panel inferior la fracción de radiación absorbida por la atmósfera desde la superficie hasta el tope de la atmósfera en función de la longitud de onda, y en el panel del medio el porcentaje absorbido desde la tropopausa hasta el tope de la atmósfera. Las diferentes moléculas que contribuyen a la absorción están señaladas en cada caso.

De esta figura se pueden observar varias cosas. En primer lugar se ve cómo

la atmósfera es bastante transparente a la luz solar, no así al calor radiante emitido por la Tierra. En segundo lugar se aprecia el papel del ozono y el oxígeno molecular para absorber la radiación ultravioleta proveniente del Sol, lo que ocurre en la parte alta de la atmósfera. En tercer lugar se puede identificar al vapor de agua y al CO_2 como los principales gases que absorben en la troposfera la radiación emitida por la Tierra, con contribuciones menores del metano y los óxido de nitrógeno.

Estas propiedades ópticas de la atmósfera explican el llamado efecto invernadero: la atmósfera deja pasar la radiación solar, ésta es absorbida en la superficie terrestre que se calienta y emite radiación de onda larga; la atmósfera es muy opaca a esa radiación terrestre y la absorbe, se calienta y a su vez emite tanto hacia el espacio exterior como hacia la superficie, lo que produce un calentamiento de la superficie. El efecto invernadero permite explicar la diferencia entre la temperatura observada y la calculada con el modelo de la sección anterior.

Con estas observaciones en mente uno puede hacer un cálculo sencillo que ilustra el efecto de la atmósfera. Pasamos del modelo cero dimensional, puntual, representado en la Ecuación 2.1 a un modelo en dos capas, la superficie y la atmósfera. No alcanza a ser unidimensional completo, pues representa la dimensión vertical de la manera más simple con dos capas discretas en lugar del continuo. Se mantiene las misma cuantificación sobre la Tierra total, sólo que las dos capas dan origen a una distribución interior en la cual la superficie resulta más caliente. En consecuencia la cantidad de energía neta en forma de radiación de onda corta que la Tierra toda recibe del Sol sigue siendo $(1 - \alpha)S_0/4$, que denotaremos por E .

El papel de la atmósfera se ilustra en este modelo simple mediante dos parámetros que van a reflejar su transparencia a la radiación solar y su opacidad al calor radiante emitido por la superficie; los valores de estos parámetros pueden justificarse de observaciones como se ve en la Figura 2.6. Diremos que las transmisividades respectivas son 90 % y 20 %, valores que permiten hacer un cálculo de temperaturas cercanas a las observadas, o sea, son parámetros de un modelo ajustados para que den el resultado esperado.

Si denominamos la radiación emitida por la superficie por x y la emitida por la atmósfera por y , tenemos un esquema como el que se ilustra en la Figura 2.7. La atmósfera emite tanto hacia el espacio exterior como hacia la superficie. Es entonces posible escribir dos ecuaciones para las dos incógnitas, por ejemplo el balance en la superficie y en el sistema completo,

$$\begin{aligned} 0,9E + y - x &= 0 \\ 0,2x + y &= E. \end{aligned} \tag{2.2}$$

De allí se resuelve fácilmente, $x = 1,58E$ y $y = 0,68E$. Tanto la superficie

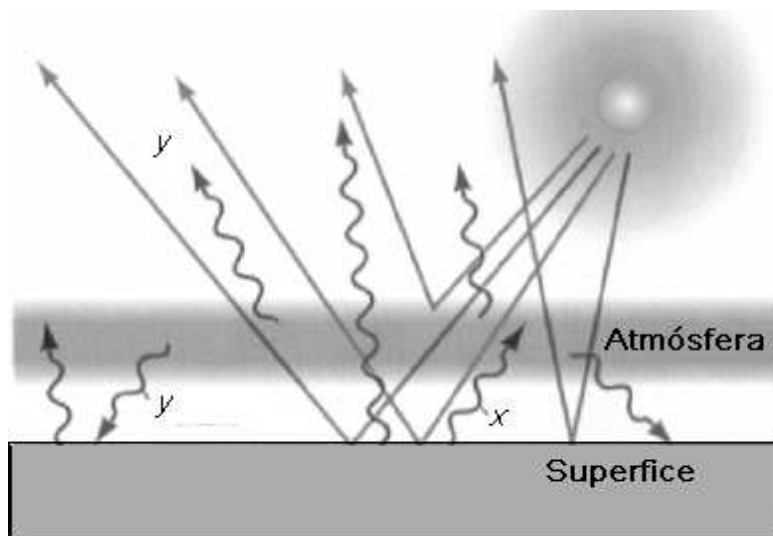


Figura 2.7: Esquema de un modelo de dos capas para ilustrar el efecto invernadero.

como la atmósfera siguen la ley de Stefan-Boltzmann y por lo tanto podemos calcular sus temperaturas T_s y T_a que resultan en

$$\begin{aligned} T_s &= \sqrt[4]{\frac{x}{\sigma}} = 286 \text{ K} \\ T_a &= \sqrt[4]{\frac{y}{\sigma}} = 232 \text{ K}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Este modelo de dos capas da como resultado que la superficie es 31 K más caliente que el modelo puntual, lo que ilustra muy bien el papel de la atmósfera y que ha venido a conocerse como efecto invernadero. El nombre no es totalmente afortunado, pues tales construcciones cerradas de techo transparente que se usan en climas fríos para elevar las temperaturas y mejorar la agricultura, logran el efecto fundamentalmente por no dejar circular el aire. Pero el vocabulario ya está establecido.

Como se explicó, los gases más importantes de efecto invernadero son el vapor de agua y el CO_2 . Luego en menor medida está el metano. Sin embargo, el papel radiativo de la atmósfera es más complicado por el efecto de aerosoles, las nubes y el polvo que incluye también enfriamiento debido a aumento del albedo. También es interesante el papel del ozono. En el Capítulo 3 sobre cambio climático se discutirá el efecto del incremento por actividades antrópicas

de la concentración de los gases de efecto invernadero sobre el denominado calentamiento global.

El ozono (O_3) estratosférico resulta de la disociación de la molécula de O_2 por efecto de la luz ultravioleta y la posterior reacción con oxígeno molecular. En la Figura 2.6 se puede apreciar como prácticamente toda la radiación solar de longitud de onda inferior a $0,3\mu m$ es absorbida a alturas mayores a 13 km por esta disociación del oxígeno y por el ozono mismo, que por ser una molécula tri-atómica tiene absorción por rotación. Como la radiación ultravioleta es cancerígena, el efecto protector de la capa de ozono en la estratosfera es benéfico para la salud. Desde el punto de vista climático, su efecto es de enfriamiento de la superficie pues bloquea la entrada de radiación solar. La emisión antrópica de gases que son precursores de compuestos que reaccionan químicamente con el ozono ha sido motivo de alarma por la aparición del llamado agujero de la capa de ozono. Entre estos compuestos químicos los más importantes son los fluorocarbonos, que se emplean como refrigerantes en neveras y acondicionadores de aire y como gas comprimido inerte para impulsar aerosoles.

Hoy está en marcha un proceso exitoso para resolver el problema del llamado agujero en la capa de ozono y retornar a una condición semejante a la natural. El caso del ozono es un ejemplo de acción conjunta de la humanidad para identificar un problema y encontrar sus causas, acordar la solución y aplicarla. En este proceso participan los científicos, los economistas, los políticos y los ciudadanos comunes. El papel de la ONU fue importante a través del Protocolo de Montreal.

En la troposfera el ozono tiene su origen en la contaminación industrial y su efecto es de calentamiento por efecto invernadero. Sin embargo su influencia es menor que la de los demás gases de invernadero.

Las nubes tienen un papel muy importante en el equilibrio energético. Por un lado enfrían la superficie por absorción de radiación solar y mayor albedo. Por otro lado también tienen efecto invernadero y por lo tanto calientan. El efecto neto depende del tipo de nube, del número, tamaño y distribución de las gotas de lluvia o los cristales de hielo y de su desarrollo vertical.

2.2.3. Ajuste Convectivo

La aplicación de un modelo de equilibrio radiativo, con más capas y con una mejor caracterización de las propiedades de absorción de las diferentes componentes lleva a un modelo más realista que el anterior, pero todavía muy simple, pues ignora el transporte de calor sensible y latente desde la superficie, que representa aproximadamente el 60 %, mientras que el flujo neto de radiación de onda larga es apenas el 40 %.

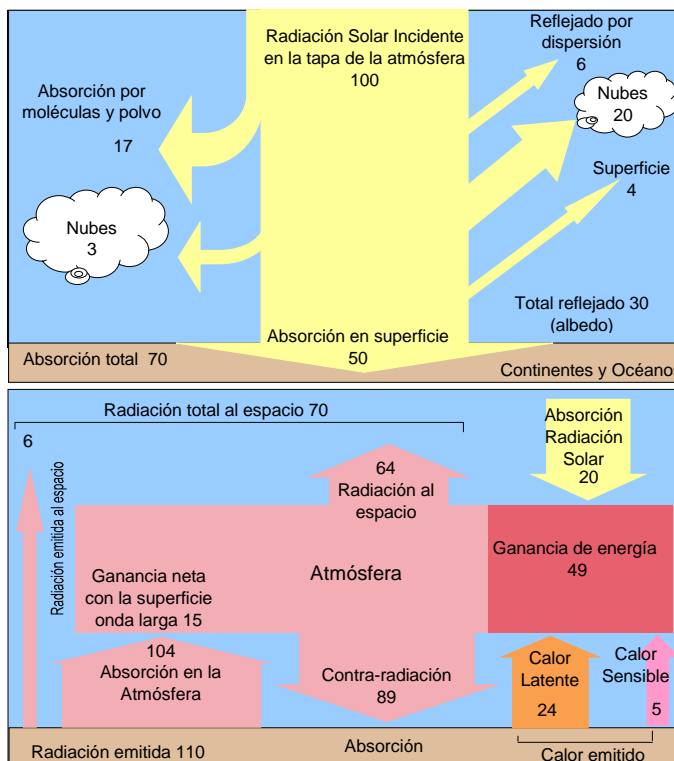


Figura 2.8: Esquema de las componentes del balance energético en porcentajes de la constante solar. En el panel superior se representan los flujos de radiación de onda corta y en el inferior los de radiación de onda larga y el flujo de calores sensible y latente. Adaptada de Hartmann [1994].

El transporte convectivo se debe a la diferencia de densidades que resulta de la diferencia de temperatura. Como se explicó en la Sección 2.1.2 la variación de la presión atmosférica en la vertical sigue una ley hidrostática y la temperatura en la troposfera se ajusta a la ley de conservación de energía teniendo en cuenta los flujos de radiación, calor sensible y calor latente, y el trabajo asociado a la compresión o expansión que resulta del cambio en la presión. Un modelo que ignore el flujo de calor sensible y calor latente y sólo tenga en cuenta el ajuste radiativo resulta en un perfil de temperatura con gradientes (disminución de la temperatura con la altura) muy altos, del orden de 13 K/km, superior al gradiente adiabático seco que es del orden de 10 K/km. Este último representa el gradiente vertical que resulta de la conservación de energía sin ningún flujo de calor. Esto explica la circulación vertical predominante en la troposfera debido a la desestabilización de las capas bajas más calientes y menos den-

sas que por lo tanto tienden a ascender y a los flujos descendentes necesarios para conservar masa. Esta circulación vertical es la que explica el nombre de la capa troposférica como una capa bien mezclada. La presencia del vapor de agua introduce un factor adicional a tener en cuenta, pues el enfriamiento de aire húmedo producto del ascenso puede saturarlo y producir condensación del vapor como se ve de la ecuación de Clausius-Clapeyron. Este cambio de fase tiene asociado la liberación de calor latente, por lo que los gradientes observados son menores, del orden de $6,5 \text{ K/km}$ y cercanos al llamado gradiente pseudo-adiabático saturado que es de 5 K/km . Este último corresponde al cambio de temperatura por el ajuste de presión a medida que cambia de altura; que resulta de la conservación de energía en una parcela saturada sin intercambio de calor con su entorno y tiene en cuenta la liberación de calor latente de condensación. Es decir la troposfera tiende a buscar un estado de equilibrio energético.

Los desequilibrios resultantes de diferencias en las propiedades radiativas de la superficie (albedo) o la atmósfera (cambios en la humedad o la cobertura de nubes por ejemplo) y por la desigual distribución de la insolación en el tiempo y el espacio producen diferencias de temperatura, con la correspondiente diferencia en presión atmosférica. En respuesta a estos gradientes la circulación atmosférica trata de restablecer el equilibrio. La circulación oceánica contribuye también a la redistribución de energía en una proporción semejante a la atmósfera.

2.2.4. Distribución de Insolación y Flujo de Energía

Es conveniente tener un panorama completo de los flujos de energía. La Figura 2.8 presenta un esquema del balance global de energía en porcentajes de la constante solar [Hartmann, 1994]. Respecto al balance de onda corta, representado arriba, las nubes reflejan el 20 %, la superficie el 4 % y la atmósfera el 6 % mediante dispersión hacia atrás, para un total de 30 % que constituye el albedo total de la Tierra. El restante 70 % es absorbido, 50 % por la superficie, 17 % por las moléculas y el polvo en la atmósfera y 3 % por las nubes.

Abajo se representa el balance de onda larga y los flujos de calor sensible y latente. La Tierra toda emite al espacio exterior en forma de calor radiante o radiación de onda larga el 70 % de la constante solar que sumado a lo reflejado cierra el balance. El total emitido está compuesto por un 64 % que emite la atmósfera y un 6 % que emite directamente la superficie y traspasa la atmósfera.

Además, la superficie y la atmósfera están en balance. La superficie recibe y entrega un total equivalente al 139 % de la constante solar. La entrada está representada por la ya anotada absorción de radiación solar del 50 % más la

absorción de radiación de onda larga proveniente de la atmósfera del 89 %. La salida está compuesta por el 6 % ya indicado de emisión de radiación de onda larga que traspasa la atmósfera, más 104 % que le emite a la atmósfera, más 24 % de flujo de calor latente y más 5 % de calor sensible.

A la atmósfera entran y salen el equivalente al 153 % de la constante solar. La entrada está representada por los ya anotados 20 % de absorción de radiación solar y el flujo desde la superficie de 133 % (total del flujo de salida desde la superficie menos el 6 % que va directamente al espacio exterior). La salida está representada en la emisión al espacio exterior de 64 % y la emisión hacia la superficie de 89 %. La atmósfera tiene una ganancia en su intercambio de radiación de onda larga con la superficie del 15 % y además una ganancia energética adicional del 49 % por la absorción de radiación solar y los flujos de calor latente y sensible desde la superficie. El total de esta ganancia se compensa con la emisión de 64 % al espacio exterior. Estos valores son indicativos de la importancia relativa de los procesos, pero puede haber algunas diferencias en la estimación de ellos entre diferentes autores.

La cantidad de radiación solar incidente en un sitio determinado depende de su latitud, de la hora del día y la época del año. Estos factores determinan una distribución desigual de la radiación que se refleja en el ciclo diurno, en el ciclo anual y en la distribución desigual entre las zonas polares que reciben en promedio mucho menos radiación y las zonas tropicales que reciben más. Como resultado del ciclo anual y la oblicuidad del eje de rotación el hemisferio que se encuentra en la estación de verano recibe mucha más radiación que el que está en invierno.

La Figura 2.9 ilustra la distribución espacial y temporal de la insolación solar. Se puede observar las zonas oscuras en los círculos polares en la estación de invierno. También se aprecia que en verano las zonas polares reciben bastante energía. Las zonas tropicales tienen una distribución de la insolación más uniforme en el año, y en promedio reciben más que las zonas polares. También en la figura se representa el albedo, la radiación absorbida, la emitida y la neta en función de la latitud, para el año y los meses extremos de verano en cada hemisferio. La radiación solar absorbida que es igual a la incidente menos la reflejada sigue un patrón semejante a la radiación incidente. Para el promedio anual esto se explica porque la radiación reflejada varía poco con la latitud, a pesar de que el albedo sí es mayor en las zonas polares. Pero esto se compensa con la menor radiación incidente en estas zonas. En los meses de verano, la variación latitudinal de la energía incidente es mucho mayor que la correspondiente variación de la radiación reflejada. La radiación emitida por la Tierra, panel derecho, tiene una menor dependencia latitudinal y estacional. Se observa que en el año los trópicos tienen un exceso de energía radiativa mientras que los polos de ambos hemisferios tienen déficit. En los meses de verano, cada

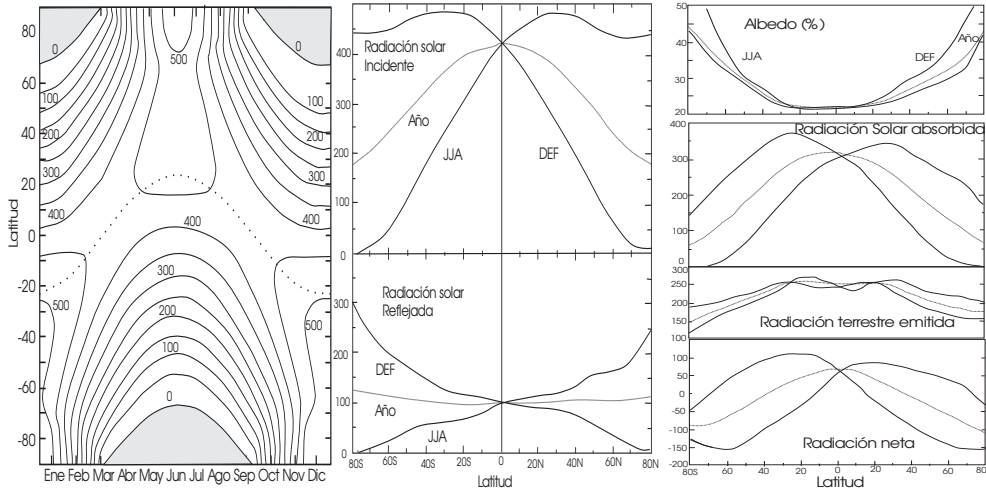


Figura 2.9: Izquierda: insolación diaria (Wm^{-2}) en el tope de la atmósfera en función de la latitud y época del año. Las áreas sombreadas representan cero insolación. La declinación solar se representa con línea punteada. Centro, de arriba hacia abajo: distribución latitudinal de la radiación solar incidente y radiación solar reflejada en el tope de la atmósfera (Wm^{-2}), para los meses de diciembre-enero-febrero (DEF), junio-julio-agosto (JJA) y promedio anual (Año). Derecha, de arriba hacia abajo: distribución latitudinal del albedo en %, la radiación solar absorbida, radiación terrestre emitida y la radiación neta en (Wm^{-2}), para los meses de diciembre-enero-febrero (DEF), junio-julio-agosto (JJA) y promedio anual (Año). Adaptada de Peixóto and Oort [1992].

hemisferio tiene un exceso y el hemisferio en invierno déficit. Otra manera de visualizar el balance de radiación neta se presenta en la Figura 2.12.

El análisis anterior no considera el tipo de superficie que influye en gran medida en el albedo. En particular la distribución de los continentes, la presencia de hielo o nieve y la clase de cobertura vegetal. En la Figura 2.10 se presentan mapas del albedo promedio para los meses de enero, abril, julio y octubre. El albedo varía bastante según la región y la época del año. La influencia de las nubes se puede ver por ejemplo en el alto albedo afuera de la costa occidental de Suramérica, donde prevalecen nubes bajas tipo estrato. El ciclo anual del albedo sigue la posición del sol. Las regiones despejadas de los océanos tienen albedo muy bajo, mientras que los desiertos tienen generalmente alto albedo.

En las regiones tropicales el albedo es afectado por la distribución de la nubosidad. En las regiones polares, la distribución estacional del albedo depende de las capas de hielo y de la inclinación de los rayos del sol. La distribución de tierra y mar es determinante, no solo por su efecto sobre el albedo y por

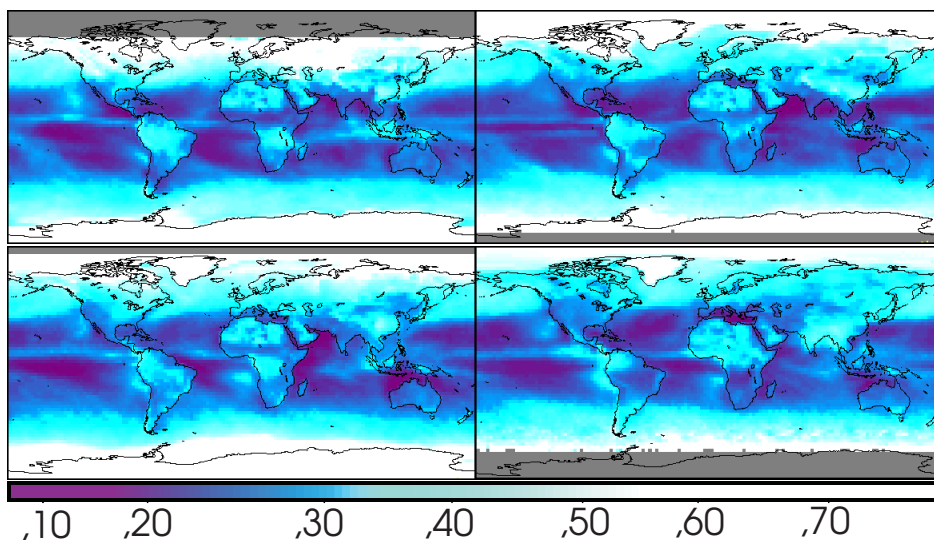


Figura 2.10: Mapas de la climatología del albedo promedio (incluye efecto de las nubes) para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario, escala de colores indicada. Calculados a partir de mediciones del Proyecto The Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) y elaborados por el departamento de Meteorología de la Universidad de Wisconsin.

tanto la absorción de radiación, sino por la gran inercia térmica del océano. Esto se refleja por ejemplo en el rango anual de temperaturas, es decir la diferencia entre la máxima temperatura promedio diaria en el año y la mínima. La Figura 2.11 muestra un mapa de este rango. A pesar de que no se muestran los continentes su efecto es evidente. A igual latitud, por ejemplo a 40°N , el rango es muy inferior sobre mar a sobre continente, 8 K contra 28 K. Note la diferencia entre los dos hemisferios, mientras el rango en el Hemisferio Norte alcanza valores de más de 50 K, en el Sur no sobrepasa los 20 K.

La Figura 2.13 muestra los mapas con la climatología de la temperatura superficial para los meses de enero, abril, julio y octubre, representativos del ciclo anual. Se puede apreciar el efecto de la insolación, su variación con la época del año y el efecto de la distribución tierra-mar. Hay muchas observaciones interesantes que se pueden hacer a partir de la información consignada en estas figuras. Por ejemplo, durante el invierno la temperatura en Inglaterra es bastante mayor que en Labrador, dos sitios en orillas opuestas del Atlántico, a pesar de que tengan igual latitud. La explicación está en la influencia de la corriente cálida del Golfo y la circulación termohalina profunda.

Son ilustrativas otras comparaciones entre puntos continentales y oceánicos a igual latitud, o a igual latitud en diferentes cuencas oceánicas, o en ambos he-

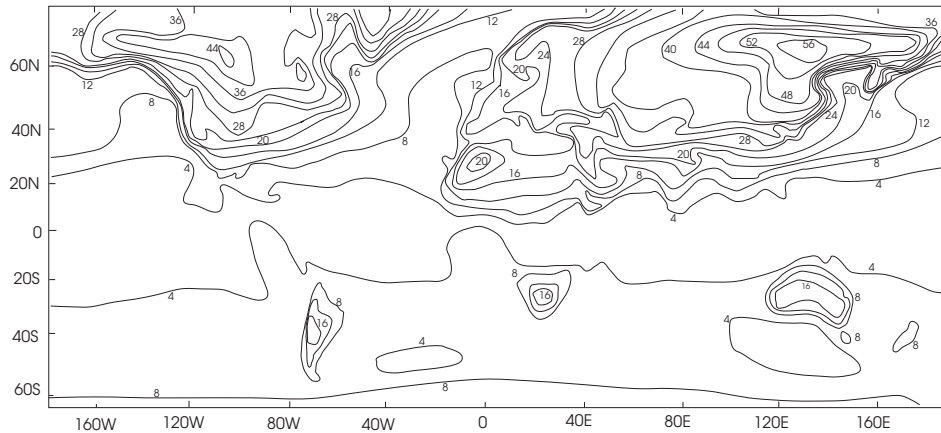


Figura 2.11: Rango anual de temperatura superficial en K. La topografía no está representada para enfatizar el control dominante de la distribución tierra-mar en el ciclo anual de temperatura. Tomada de Monin [1975].

misferios en las estaciones correspondientes y opuestas, la variación en el año para diferentes sitios. La línea de cero temperatura en el Hemisferio Norte penetra hasta latitudes medias en los continentes en invierno, mientras que en el Hemisferio Sur permanece restringida a latitudes altas. De manera semejante, en el respectivo verano la Antártida y parte del Océano Ártico permanece con temperaturas bajo cero, mientras que en el Hemisferio Norte sólo Groenlandia.

2.3. Circulación Atmosférica

El aire es un fluido y por tanto tiene capacidad de movimiento lo que conlleva transporte de calor y humedad. El resultado final de la circulación es una tendencia a la reducción de las diferencias de temperatura forzadas por el desigual calentamiento diabático entre las zonas tropicales y polares o por propiedades diferentes de la superficie (mar, tierra, albedo, topografía, humedad, vegetación).

La circulación general puede verse [Wallace and Hobbs, 1977] en el contexto de un ciclo de energía en el cual los flujos atmosféricos extraen energía potencial disponible, por la distribución a la masa atmosférica, lo que permite mantener la circulación a pesar de la disipación por fricción, que tiende a convertir esta energía en energía interna. El calentamiento diabático diferencial mantiene el suministro de energía potencial. En términos estadísticos, el calentamiento diabático tiende a elevar el centro de gravedad de la atmósfera.

Una descripción completa de la circulación atmosférica incluye el estado medio

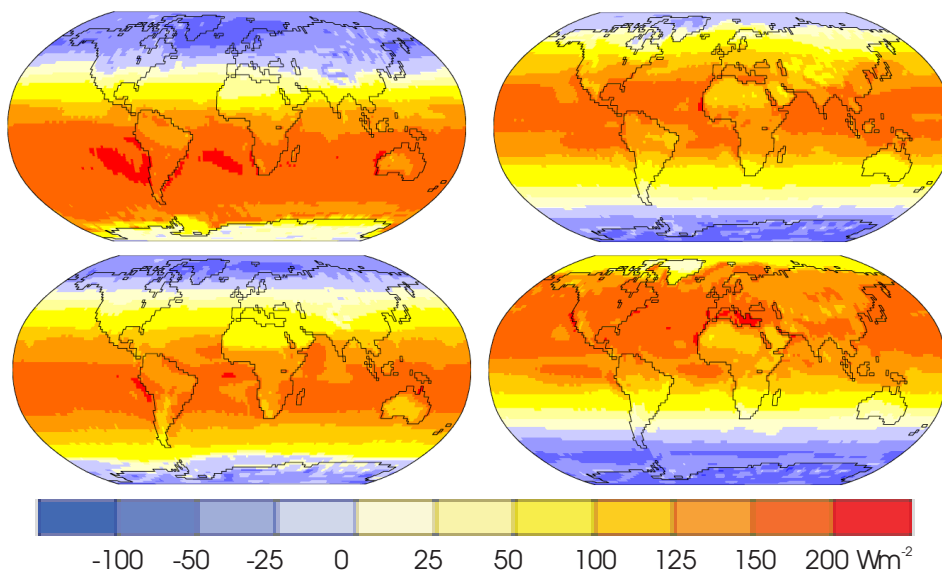


Figura 2.12: Mapas de la climatología 1959–1997 de la radiación neta en Wm^{-2} para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-álisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon.

de los vientos, la temperatura, la presión atmosférica, la humedad, la cobertura de nubes, la precipitación y la evaporación, la variabilidad de esas cantidades en los ciclos diario y anual, y las principales componentes de la variabilidad interanual e interdecenal.

En la primera parte se presenta una descripción de las leyes físicas que rigen la circulación atmosférica, en la segunda parte se interpretan las características básicas de la circulación mediante la aplicación de estas leyes y en la parte final se presenta una descripción apoyada fundamentalmente en observaciones. Según el interés de los lectores pueden omitir partes, que de todas maneras corresponden a una presentación muy resumida de un asunto complejo.

2.3.1. Base Física

El movimiento del aire obedece a las leyes de conservación de masa o continuidad, conservación de momentum o segunda ley de Newton y conservación de energía. Como el agua en sus diferentes estados ocupa un papel importante en los procesos atmosféricos también hay que considerar su conservación.

Aunque el aire es compresible, para los movimientos a escala correspondiente a la circulación general y para flujo puramente horizontales la atmósfera se

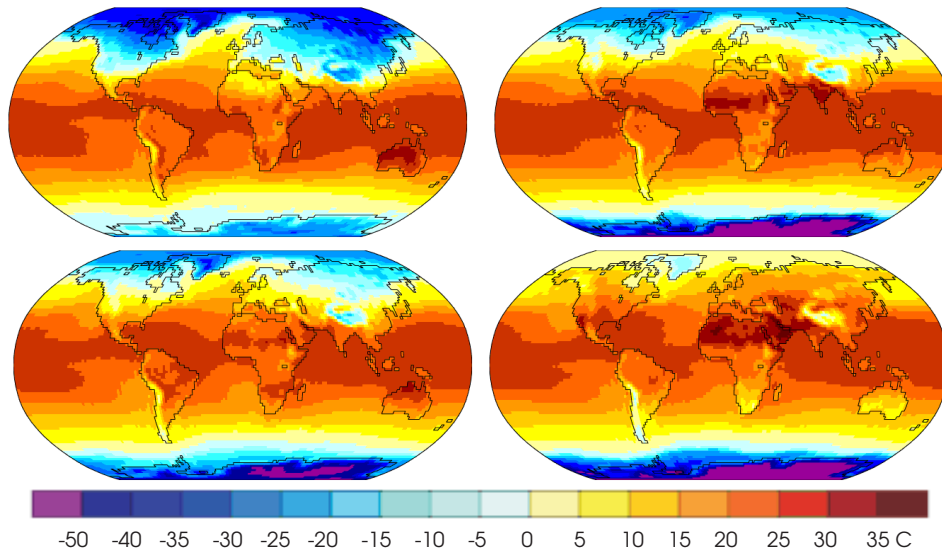


Figura 2.13: Mapas de la climatología 1959–1997 de la temperatura superficial en °C para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-álisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon.

comporta como si fuera un fluido incompresible. Cuando hay movimientos verticales es necesario considerar que la densidad depende de la altura a través de la presión. La continuidad implica que en zonas donde hay convergencia o divergencia de vientos horizontales, ésta se debe compensar con flujo vertical. Por ejemplo en la superficie, la convergencia necesariamente implica ascenso y la divergencia descenso. La convergencia o divergencia no sólo ocurre cuando la dirección de los vientos es de signo contrario, también ocurre por los cambios de magnitud. Por ejemplo, si en una región los vientos son paralelos en una misma dirección pero disminuyen de magnitud en la dirección del movimiento se tiene convergencia, recíprocamente si aumenta se tiene divergencia.

La segunda ley de Newton expresa que el producto de la masa por la aceleración es igual a la suma de las fuerzas. En el caso de los fluidos la aceleración involucra, además del cambio de la velocidad en el tiempo, la llamada aceleración convectiva debida a la no uniformidad espacial del campo de velocidades. Este término da origen a complicaciones matemáticas pues aparecen productos de la velocidad por su derivada espacial, términos no lineales. Las principales fuerzas son la gravedad, la presión, la fricción y las fuerzas aparentes debidas a la rotación del sistema de coordenadas que se toma fijo con respecto a la superficie de la tierra sólida. Estas últimas son la fuerza centrífuga (que nor-

malmente se expresa combinada con la gravedad) y la fuerza de Coriolis. La componente horizontal de importancia de la fuerza de Coriolis es proporcional al seno de la latitud, por tanto máxima en los polos y cero en el Ecuador.

La conservación de momento angular alrededor de cualquier eje es una consecuencia de la segunda y tercera ley de Newton cuando no hay torques externos. Este teorema permite estudiar el movimiento de sistemas de partículas de manera global, sin necesidad de considerar las interacciones entre ellas, pues por la tercera ley, los torques de la acción y reacción se cancelan. En el caso de la Tierra es natural considerar el momento angular alrededor del eje de rotación.

En términos prácticos se puede considerar que el sistema tierra-atmósfera-oceano conserva el momento angular. Estrictamente hablando, la fricción por fuerzas de marea produce un pequeño retardo en la rotación de la Tierra que se manifiesta en un incremento en la duración del día de aproximadamente $22,5 \mu s$ por año [Stacey, 1977; Mesa, 2002], lo cual sólo es apreciable a escalas de tiempo milenarias o mayores y justifica la aproximación a un altísimo grado de precisión para los fenómenos desde la escala diaria hasta secular (cientos de años). Como la existencia de los continentes inhibe la circulación oceánica circumpolar, el momento angular del océano no cambia de manera significativa. La atmósfera sí puede cambiar momento angular a expensas de la tierra sólida. Existe una excelente correlación entre la duración del día y el momento angular atmosférico.

La conservación de energía establece que el cambio en la energía interna del sistema es igual a la diferencia entre el flujo neto de calor hacia el interior del sistema y el trabajo hecho por el sistema. Para una parcela el cambio en la energía interna es proporcional al cambio de temperatura. El trabajo resulta del producto de la presión por el cambio de volumen. El flujo de calor es debido a absorción o emisión de radiación, al flujo de calor latente por condensación o evaporación de agua, la conducción de calor con el entorno por difusión molecular y la convección por flujo organizado.

Las ecuaciones completas que describen el movimiento de la atmósfera son complejas por lo que normalmente se recurre a aproximaciones. Ante tales simplificaciones las siguientes preguntas son pertinentes: ¿Cuáles términos son pequeños? ¿Cómo se procede a desprejar términos? Sin embargo, según la teoría, si el sistema es caótico lo pequeño no es despreciable. La pregunta entonces es cómo tenerlo en cuenta. Esto tiene relación con la capa límite, regiones delgadas cerca a las fronteras (la superficie para el caso atmosférico) en las cuales hay fuerzas que no se pueden desprejar, aunque lejos de ellas sí. Lo pequeño se vuelve ruido y eventualmente se podría mirar el sistema como una ecuación diferencial estocástica, que tiene la componente determinista correspondiente a los términos grandes y el efecto de lo pequeño en la

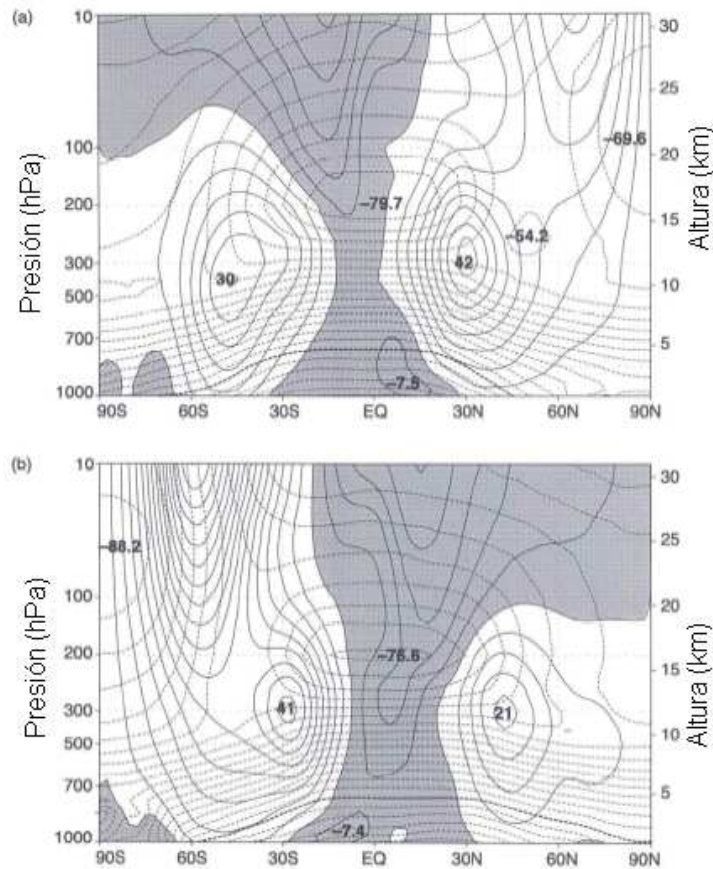


Figura 2.14: Corte vertical latitudinal con el promedio zonal de viento zonal. Las líneas sólidas representan contornos de velocidad en intervalos de 5 ms^{-1} , las líneas punteadas son contornos de temperatura en intervalos de $5 \text{ }^\circ\text{C}$, las áreas con vientos del este están sombreadas, el contorno correspondiente a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ es más grueso. El cuadro superior es para los meses de diciembre-enero-febrero y el inferior para junio-julio-agosto. Climatología del reanálisis de NCEP/NCAR para 1959-1997.

componente estocástica. ¿Cuál es la estructura del ruido? es decir, ¿cuál es su correlación espacio temporal? En cierta manera el carácter impredecible del clima se explica como resultado de estos asuntos que permanecen abiertos.

Las aproximaciones típicas [Holton, 1992] en los extra trópicos a escala sinóptica (días y miles de kilómetros) resultan de despreciar los términos menores que son: los inversamente proporcionales al radio de la Tierra debidos a la curvatura, los términos de fricción (lejos de la superficie) y el término de Coriolis

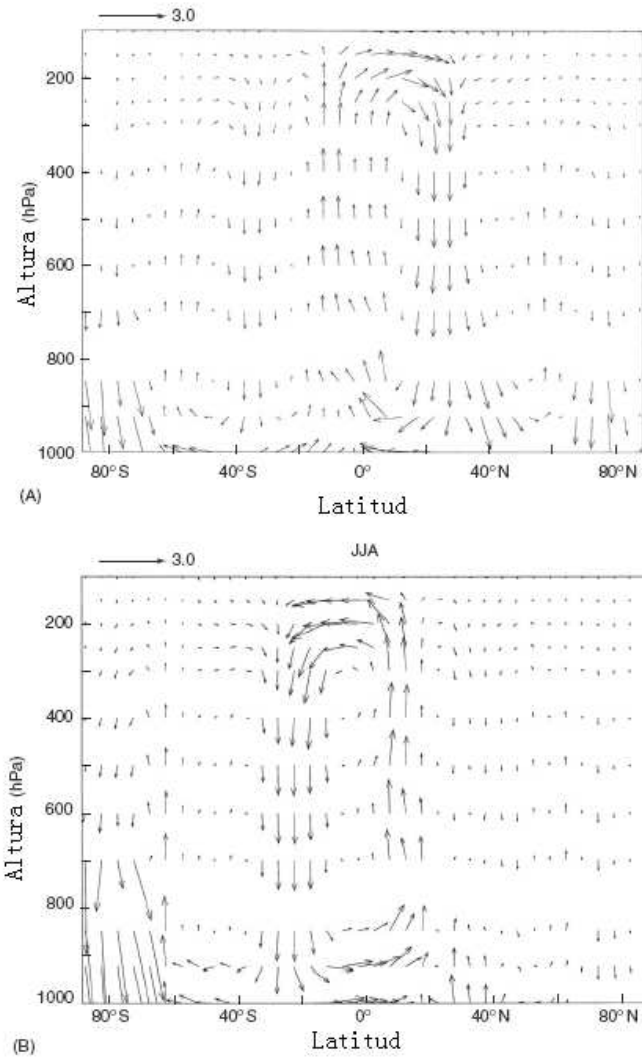


Figura 2.15: Promedio zonal de la circulación meridional vertical. El cuadro superior es para los meses de diciembre-enero-febrero y el inferior para junio-julio-agosto. Climatología del reanálisis de NCEP/NCAR para 1959-1997.

proporcional al coseno de la latitud. Los términos mayores son los de Coriolis proporcional al seno de la latitud, los debidos al gradiente de presiones y la gravedad. Los términos de aceleración son un orden de magnitud menor para el movimiento horizontal y despreciable para el movimiento vertical. La aproximación horizontal más básica es el llamado flujo balanceado (aceleración

tangencial despreciable), en el cual los casos simples son el flujo geostrófico (balance entre Coriolis y gradiente de presiones, paralelo a isobaras con radio de curvatura grande), flujo inercial (balance entre Coriolis y fuerza centrífuga, el gradiente de presión es despreciable, el movimiento es periódico y las trayectorias son circulares), la aproximación del viento gradiente (incluye la aceleración, la fuerza de Coriolis, la fuerza centrífuga y la fuerza debida al gradiente de presiones).

La aproximación vertical más simple es el balance hidrostático, es decir el balance entre la gravedad y la fuerza resultante del cambio de presión. Para la escala sinóptica además, la perturbación del campo de presiones y la perturbación del campo de densidades también están en equilibrio hidrostático. De la aproximación del viento térmico, teniendo en cuenta el ajuste hidrostático, se deduce que los gradientes horizontales de temperatura necesariamente producen cortante vertical. Esto explica por ejemplo las corrientes de chorro de latitudes medias y la advección meridional de calor.

En el caso de un fluido incompresible como el agua y sin rotación, el movimiento cruza las líneas de igual presión o isobaras, en la dirección de decrecimiento de la presión. Cuando hay que considerar la compresibilidad del aire y la rotación de la Tierra resulta la situación antes descrita. Los flujos horizontales de gran escala son también movidos por la diferencia de presiones, pero la fuerza de Coriolis desvía el movimiento a la derecha (izquierda) en el Hemisferio Norte (Sur) lo que da origen a una componente a lo largo de las isobaras. El equilibrio entre estas fuerzas es el llamado flujo geostrófico. Cuando se incorpora la diferencia de densidades que resulta de la diferencia de temperatura se llega al llamado viento térmico.

Para los trópicos a escala sinóptica y lejos de las zonas de convección la posibilidad de aproximación es incluso mayor pues el flujo es prácticamente no divergente, lo que implica que la función de corriente es suficiente. La aproximación permite una ecuación de diagnóstico entre la función de corriente y el campo geopotencial. La dificultad está en las zonas de convección y en los movimientos a escala planetaria donde las ondas ecuatoriales son importantes incluso en regiones por fuera de precipitación activa.

Las ondas ecuatoriales son perturbaciones que se propagan zonalmente y que están atrapadas en los trópicos, es decir, su amplitud decae hacia los extatropicos. El calentamiento diabático que resulta de convección organizada puede activar esta ondas. Este mecanismo es responsable de las llamadas teleconexiones, es decir que se pueden presentar respuestas a grandes distancias por efecto de tormentas localizadas. Más aun, mediante la perturbación de los patrones de convergencia de la humedad en los niveles bajos pueden controlar parcialmente la distribución temporal y espacial de la convección y por tanto de la lluvia.

2.3.2. Descripción

Un caso muy común e importante de analizar es la circulación térmica directa, que se presenta en varios de los patrones que se discutirán a continuación, por ejemplo en las celdas de Hadley, en la brisa marina o en los monzones. Resulta de calentamientos horizontales diferenciales que dan origen a diferencia de densidad y al correspondiente ascenso sobre la zona cálida y descenso sobre la zona fría. La presencia de humedad normalmente da origen a lluvias sobre la zona cálida y a su ausencia sobre la zona fría. La liberación de calor latente en la troposfera media y alta por condensación mantiene una columna ligeramente más cálida que el ambiente. La presión superficial es ligeramente menor en la zona cálida y en altura la presión es ligeramente mayor que el entorno. Como resultado de esto hay convergencia en la parte baja sobre la zona cálida y divergencia en altura. Si no hay otras fuerzas, el gradiente de presión produce aceleración en las ramas horizontales de la circulación, lo que resulta en un incremento de la energía cinética. Se puede demostrar que para movimientos hidrostáticos balanceados, la tasa de incremento de la energía cinética por la fuerza debida al gradiente de presión en las ramas horizontales es igual a la tasa de disminución de la energía potencial por el ascenso del aire cálido y el descenso del aire frío.

El término de circulación térmica directa se reserva para el caso en el cual ambas ramas horizontales de la celda fluyen de alta hacia baja presión. Existen casos de circulación térmica en los que alguna de las ramas horizontales, por ejemplo en la más superficial, se dirige de baja hacia alta presión. Por lo tanto el flujo se desacelera y la energía cinética decrece en esta parte de la celda. Sin embargo en tal caso, en la parte alta de la circulación el flujo es en la dirección de alta hacia la baja presión y la aceleración en tal rama produce incremento de la energía cinética. Puede mostrarse que tal incremento es mayor que el decrecimiento en la rama superficial. Para esto, note que el espaciamiento entre líneas de igual presión debe ser mayor sobre la zona cálida. El balance neto es por tanto de incremento de la energía cinética. Para cerrar el balance, en las ramas ascendentes y descendentes se consume energía potencial. En estos casos se habla de circulación térmica indirecta. En la naturaleza se presentan ambas, la directa es más frecuente, pero la indirecta ocurre, por ejemplo en las zonas desérticas. Es notable que en tales casos la humedad es muy baja, y por tanto no hay liberación de calor latente.

En el análisis anterior se ignora la fricción. Cuando se tiene en cuenta, su efecto final es incremento de energía interna por calentamiento. En este caso, el flujo de energía es entonces de energía potencial a energía cinética y de ésta a energía interna. Si no hay algún proceso para recargar la energía potencial el proceso terminaría en equilibrio térmico. Pero, si hay un calentamiento

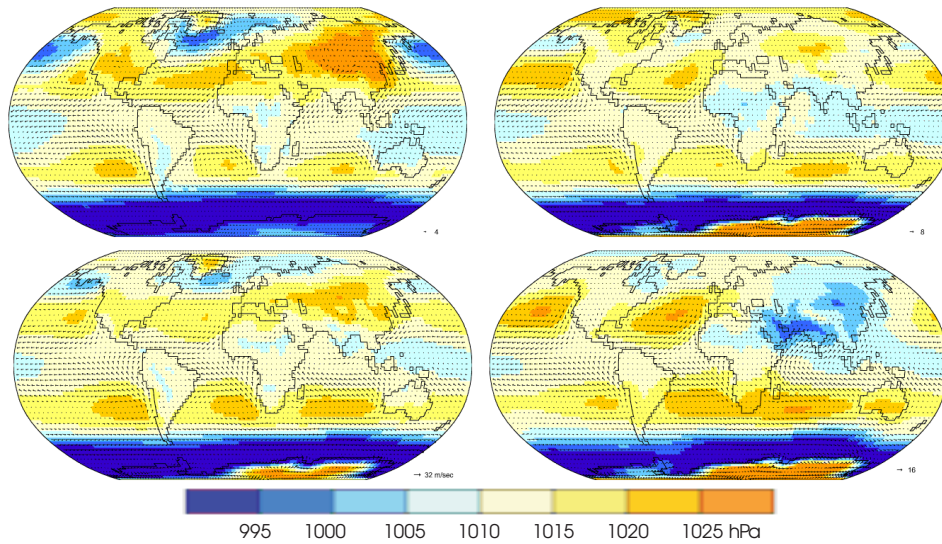


Figura 2.16: Mapas de la climatología 1959–1997 de la presión atmosférica a nivel del mar en hPa y vientos superficiales en m/s para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-álisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon.

diabático el ciclo se puede cerrar mediante la producción de energía potencial. En tal circunstancia se puede presentar un estado cuasi estacionario. La energía potencial se puede representar por la altura del centro de masa de la atmósfera. El ciclo de conversión de energía potencial a energía cinética y de ésta a energía interna corresponde entonces a procesos que tienden a bajar el centro de masa.

Una circulación térmica directa cumple ese papel por el ascenso de aire caliente menos denso, y el descenso de aire frío más denso. También por la prevalencia de flujo horizontal que cruza los contornos de igual presión en dirección a la baja presión.

Los procesos diabáticos que cierran el ciclo energético son: calentamiento en los trópicos, donde la suma de absorción de radiación solar y el calor latente de condensación excede el enfriamiento radiativo; enfriamiento de las altas latitudes donde lo contrario es válido; calentamiento de la baja y media troposfera, donde ocurre la mayoría de la condensación de vapor; y enfriamiento de los altos niveles de la atmósfera donde el enfriamiento radiativo domina.

Estos mecanismos mantienen el gradiente de temperatura del Ecuador a los polos, y expanden el aire en los niveles bajos y lo comprimen en los niveles altos.

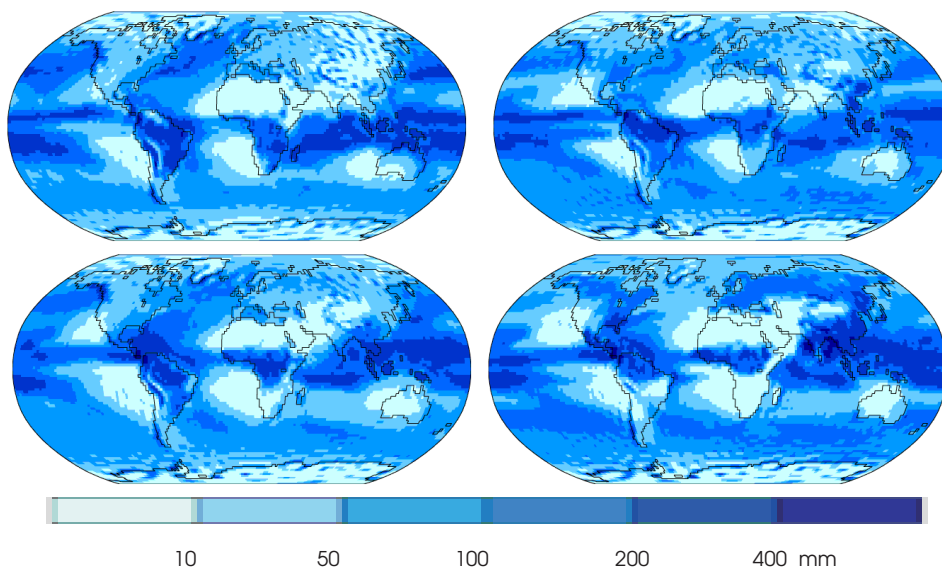


Figura 2.17: Mapas de la climatología 1959–1997 de la precipitación en mm para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-álisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon.

La circulación general requiere el mantenimiento de gradientes horizontales y verticales de calentamiento.

Esto es lo que ocurre en la circulación global con las celdas de Hadley que obedece al mayor calentamiento cerca al Ecuador y menor en las zonas polares que se explicó en la Sección 2.2.4 y se aprecia en la Figura 2.13. En cada hemisferio la celda correspondiente tiene una rama horizontal superficial que confluye cerca al Ecuador en la llamada zona de convergencia intertropical (Zcit) y transporta humedad producto de la evaporación de los mares tropicales. Las Figuras 2.14, 2.15 y 2.16 ilustran la circulación general que estamos describiendo. En la zona de convergencia el aire cálido asciende lo que resulta en enfriamiento, condensación de la humedad, nubosidad y alta precipitación. Para cada hemisferio en la parte alta de la troposfera la rama horizontal fluye hacia los extratropicos para luego descender en la zona de latitudes medias.

Las celdas de Hadley corresponden a una circulación térmica directa, por ejemplo, la presión atmosférica al nivel del mar en la Zcit es del orden de 1010 hPa, mientras en las latitudes medias es del orden de 1020 hPa. La fuerza de Coriolis actúa sobre las ramas horizontales produciendo una desviación hacia la derecha en el Hemisferio Norte y a la izquierda en el Hemisferio Sur. Los vientos de superficie en el Hemisferio Norte son por lo tanto del Noreste por lo que

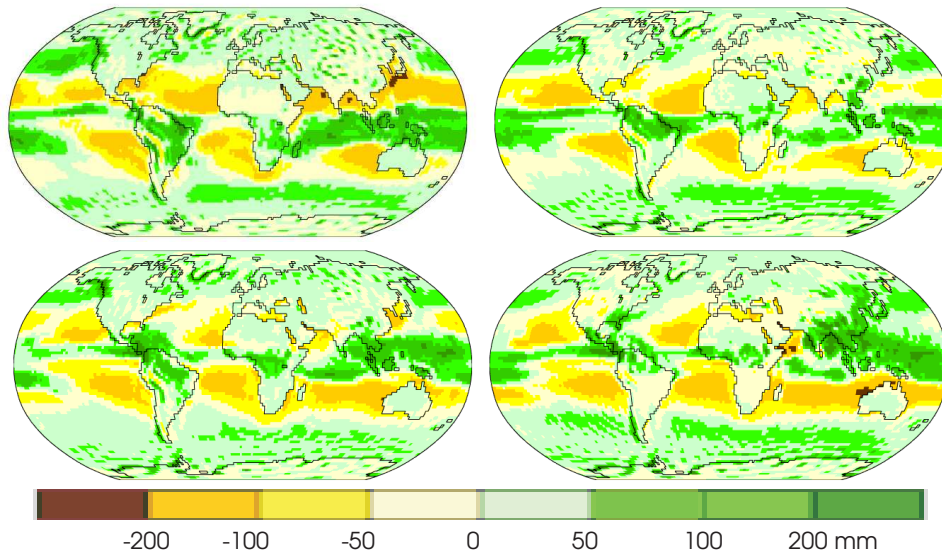


Figura 2.18: Mapas de la climatología 1959–1997 de la diferencia entre la precipitación y la evaporación en mm para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir del Proyecto NCEP/NCAR de re-análisis y elaborados por el departamento de Geografía de la Universidad de Oregon.

se conocen también como vientos del comercio por su papel en la época de la navegación intercontinental a vela. En el Hemisferio Sur son del Sureste.

Siguiendo el cambio estacional del calentamiento, la Zcit se desplaza de Norte a Sur lo que produce entre otras cosas las temporadas húmedas y secas en regiones ecuatoriales como Colombia. También hace que la celda en el hemisferio que está en invierno sea más fuerte, que la correspondiente al hemisferio en verano, ver Figura 2.15. En la figura se aprecia la existencia de otra celda de circulación meridional en los extratropicos, denominada celda de Ferrel que corresponde a una circulación térmica indirecta, con ascenso de aire frío y descenso de aire cálido.

La circulación atmosférica no es simétrica en la dirección Este–Oeste como se aprecia en la Figura 2.16. El efecto de los continentes es notorio. La distribución de la presión atmosférica superficial es un indicador general de la circulación. En el Hemisferio Norte en invierno hay centros de baja presión sobre los océanos Atlántico y Pacífico en las latitudes medias. Sobre los continentes centros de alta presión y también sobre los subtrópicos en ambos océanos. En verano las zonas de alta presión sobre los mares se intensifican, se desplazan hacia el Norte y sobre los continentes predomina la baja presión.

Esto es particularmente evidente en Asia. Es decir, hay un intercambio estacional de masa atmosférica entre mar y continente. Esto se ve reflejado en la circulación, dando origen a la llamada circulación monzónica. Por ejemplo, para la India es bastante evidente el cambio de dirección de los vientos entre las dos estaciones. Además de los cambios en presión y en temperatura se presenta en consecuencia un régimen de lluvias fuerte en verano y la estación seca en invierno. Todo esto hace parte de una celda de circulación térmica directa producto del contraste en el calentamiento continental y marino. Además de la India, este patrón monzónico se puede apreciar en África, en el norte de Australia y en alguna medida en Norte América.

La conservación de momento angular y la estabilidad de las corrientes zonales que se desarrollan en las latitudes medias explican que la circulación térmica directa no llegue hasta las zonas polares. Esta conservación impone restricciones importantes a la circulación atmosférica. Sobre la superficie los vientos no pueden tener el mismo signo en la componente Este–Oeste. En las zonas tropicales predominan vientos con componente del Este, esto significa que la atmósfera en esta zona rota más lento que la tierra. Por lo tanto allí la superficie le transfiere momento angular hacia el Este a la atmósfera mediante fricción y diferencia de presión en las caras Este y Oeste de las montañas con eje longitudinal en dirección Norte–Sur. Este momento fluye hacia la parte alta de la troposfera y es transportado hacia los polos por las celdas de Hadley y hacia la superficie en las latitudes medias. En esta zona, los vientos predominantes en superficie son del Oeste y por lo tanto la atmósfera rota más rápido que la tierra. En consecuencia, en las latitudes altas la atmósfera retorna el momento angular hacia el Este a la superficie cerrando el balance.

Un patrón importante de la circulación global es la presencia permanente de los llamados chorros subtropicales en ambos hemisferios. Estos chorros son concentraciones de viento zonal del Oeste en las latitudes medias que tiene su máxima velocidad (del orden de 30 m/s) a una altura aproximada de 10 km que corresponde a la tropopausa, como se aprecia en la Figura 2.14. Estos chorros forman parte de la frontera entre la troposfera y la estratosfera. Sobre ellos, y a sus costados polares, hay aire estratosférico seco, rico en ozono; mientras que debajo y hacia el costado ecuatorial hay aire húmedo troposférico.

La troposfera y la estratosfera se distinguen en la figura por la diferencia marcada en los gradientes verticales de temperatura, como se aprecia por el espaciamiento de las isotermas. Hay un chorro del Oeste todavía más intenso en la estratosfera media polar durante el invierno. El chorro polar del Hemisferio Sur es más intenso que el correspondiente en el Hemisferio Norte. La existencia de estos chorros está bien explicada por la conservación de momento angular y la ecuación del viento térmico. La presencia de los continentes y la variación de las estaciones imponen cambios en la intensidad y ubicación de la corriente de

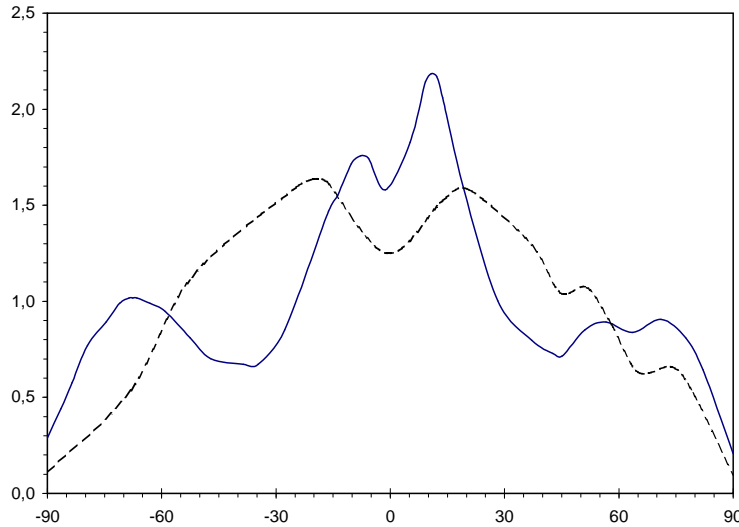


Figura 2.19: Promedios zonales de la precipitación promedio anual (líneas sólidas) y evaporación promedio anual (líneas punteadas) como función de la latitud en metros por año. Cálculos del proyecto reanálisis 1958-1997 NCEP/NCAR.

chorro subtropical. En invierno la corriente es más intensa y está más cerca al Ecuador. Además esta corriente está sujeta a una inestabilidad resultante de la amplificación de pequeñas perturbaciones por la cortante vertical del viento. En las latitudes medias el estado del tiempo cambia de manera notoria por la presencia de remolinos, ciclones y anticiclones que tienen una escala de miles de kilómetros. Estos sistemas se desplazan con la circulación media prevaleciente hacia el Este y son responsables por la mayor parte del transporte de calor, humedad y momento angular de las bajas a las altas latitudes. Estos sistemas son más activos en invierno. Estos remolinos se originan por la amplificación de perturbaciones debido a la inestabilidad baroclínica.

La circulación general explica la distribución de la precipitación. Las zonas de latitudes medias en las que predominan los centros de alta presión y los vientos descendentes son secas. Las zonas de mayor precipitación están en los trópicos, siguiendo la zona de convergencia intertropical, ver Figura 2.17. En particular sobre los continentes estos centros de convección y alta precipitación son más activos. Suramérica, África y la región cerca a Indonesia son los tres centros de mayor precipitación.

Sobre mar la Zcit es una banda más estrecha. En las zonas extratropicales, por efecto de los frentes asociados a las ondas baroclínicas también hay zonas de alta precipitación. La Figura 2.18 muestra mapas de la diferencia entre precipitación y la evaporación para los meses representativos de las estaciones. Las

zonas de alta evaporación en los océanos subtropicales son muy notorias. Los vientos alisios transportan la energía asociada al calor latente que es liberada en la condensación en la Zcit. La Figura 2.19 presenta los promedios zonales de la precipitación y de la evaporación lo que ilustra bien las zonas con exceso y déficit de agua y los flujos meridionales atmosféricos de vapor.

2.4. Circulación Oceánica

Como se indicó en la Sección 2.1.3 el papel del océano es fundamental en el clima, como fuente de humedad para la atmósfera, por su enorme capacidad de almacenar calor debido al alto calor específico del agua, a su bajo albedo y por tanto por su enorme capacidad para absorber energía solar. De hecho en el mar se absorbe más del 50 % de la energía que entra al sistema climático. Por su capacidad de fluir juega un papel comparable a la atmósfera en la redistribución de energía horizontalmente, disminuyendo el gradiente entre el Ecuador y los polos. Como fuente de humedad es base fundamental del ciclo hidrológico y su conexión con el flujo de calor latente, que contribuye a la distribución vertical de energía. Más del 90 % del calentamiento radiativo del océano es compensado por el enfriamiento por evaporación. No hay que olvidar su papel como solvente en los ciclos biogeoquímicos que estudiaremos más adelante. En esta sección nos concentramos en presentar y entender los rasgos básicos de la circulación oceánica.

La circulación oceánica responde a las mismas leyes físicas que la circulación atmosférica. Aunque el agua, a diferencia del aire, es prácticamente incompresible. Es decir, su densidad es independiente de la presión, incluso a las grandes profundidades oceánicas, pero sí es función de la temperatura y la salinidad. El agua es más densa mientras más fría o salina (Figura 2.20). Adicionalmente a las consideraciones hechas para el caso de la atmósfera, para el océano es importante considerar las fuerzas de marea debidas a la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol. Además, la geografía de los continentes impone restricciones naturales a la circulación.

En general la circulación oceánica obedece a dos procesos principales, la acción de los vientos y a las diferencias de densidades. A la primera se le conoce como la circulación inducida por los vientos y a la segunda como la circulación termohalina. En realidad ambas circulaciones no son independientes y juntas hacen parte de un sistema complejo que a su vez está ligado a todos los demás procesos del sistema climático. A pesar de que las fuerzas de marea inducen movimientos y circulación que son importantes fundamentalmente para fenómenos locales, no se considera parte de la circulación oceánica. Pero es necesario tener en cuenta que sí tienen algunos efectos climáticos como se

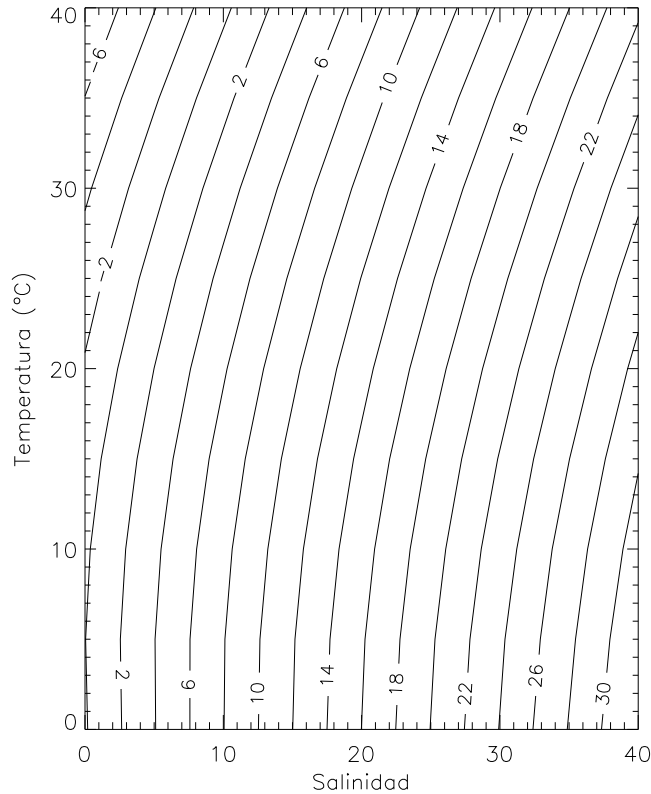


Figura 2.20: Desviación de la densidad del agua de mar con respecto a un valor de referencia de 1000 kg/m^3 en función de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y la salinidad (‰).

verá abajo con respecto a la circulación termohalina.

La salinidad promedio del agua de mar es de $34,7 \text{ ‰}$, pero espacialmente hay cambios debidos a la desembocadura de ríos, la lluvia, la evaporación y la fusión o formación de hielo. Entre un océano y otro o entre las zonas polares, extratropicales y tropicales o por la profundidad hay diferencias sistemáticas de salinidad y temperatura que han llevado al uso de denominaciones propias para los tipos de agua. La Figura 2.21 muestra la climatología de la temperatura superficial del mar para los cuatro meses representativos de las diferentes estaciones. La Figura 2.22 muestra la salinidad del agua superficial. En general el Atlántico tiene mayor salinidad que el Pacífico, aunque es visible el efecto de los ríos Amazonas y Orinoco. El Mediterráneo aunque no aparece bien en la figura tiene todavía mayor salinidad debido al exceso de evaporación sobre precipitación (ver Figura 2.18) y al carácter cerrado de la cuenca y al estrecho y cuña de Gibraltar. La zona de latitudes medias tiene mayor salinidad que la

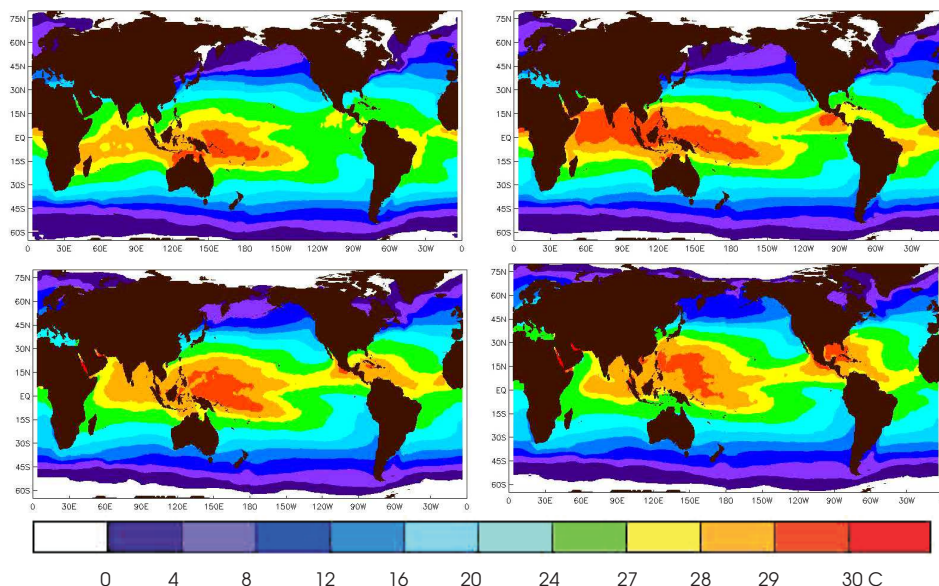


Figura 2.21: Mapas de la climatología 1961–1990 de la temperatura superficial del mar en °C para los meses de enero, abril, julio y octubre, ordenados circularmente en sentido antihorario. Calculados a partir archivo Global Sea-Ice and Sea Surface Temperature Data y elaborados por el Center for Ocean–Atmospheric Prediction Studies de la Universidad del Estado de la Florida, <http://www.coaps.fsu.edu>.

zona ecuatorial y la zona de latitudes altas, por las diferencias en precipitación. Verticalmente también hay variaciones importantes. La Figura 2.23 muestra un esquema de como cambia la temperatura con la profundidad en diversas latitudes. Naturalmente, las aguas superficiales son menos densas, tienen mayor temperatura que las aguas profundas. De manera semejante a la atmósfera, el océano se puede separar en capas.

La capa más superficial está en contacto directo con la atmósfera, absorbe la luz solar que produce calentamiento y soporta la actividad fotosintética del fitoplancton; intercambia agua dulce con la atmósfera y los continentes mediante precipitación, evaporación, y la descarga de los ríos continentales; recibe el arrastre de los vientos; e intercambia gases y otras sustancias químicas con la atmósfera y los continentes. Por el efecto del movimiento debido a la acción mecánica de los vientos y a la diferencias de temperatura y salinidad entre la superficie en la cual se produce el enfriamiento por evaporación y se recibe la precipitación, esta capa es bien mezclada. En consecuencia las principales propiedades son relativamente uniformes en esta capa. Su profundidad varía según la latitud y la época del año, desde 20 hasta 200 m.

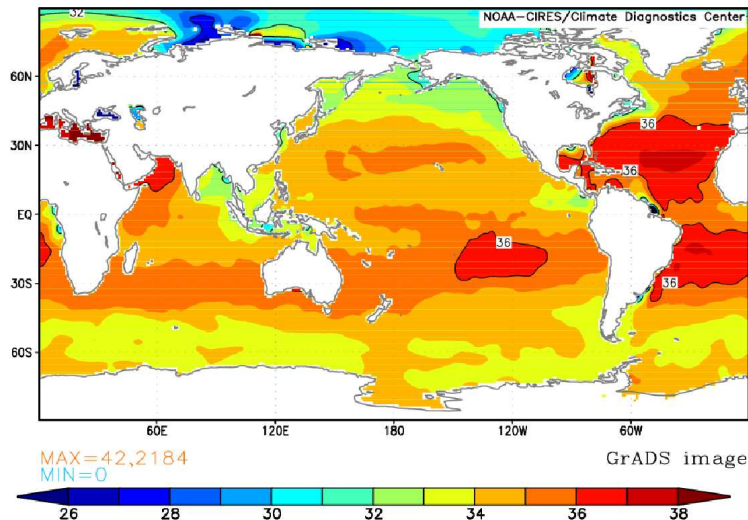


Figura 2.22: Mapa de la climatología 1961–1990 de la salinidad superficial del mar en g/kg para el mes de abril, representativo de los demás meses del año. NOAA, CIRES, CDC, <http://www.cdc.noaa.gov>.

Debajo de la capa superficial se tiene una capa intermedia en la cual la temperatura cambia rápidamente. Esta capa se conoce como termoclina. Su profundidad es menor cerca al Ecuador por efecto del llamado bombeo de Ekman, que produce surgencia (flujo vertical ascendente) como resultado del arrastre de los vientos y del cambio de signo de la fuerza de Coriolis. En zonas de latitudes medias el efecto de los esfuerzos de Ekman es flujo descendente y profundización de la termoclina.

Debajo de la termoclina se encuentran las aguas profundas de fondo. Estas aguas son más frías (aproximadamente 4°C), oscuras, reciben los desechos de la actividad biológica en la capa superficial que se precipitan por gravedad, allí soportan a otros organismos y bacterias. Algunos de los desechos van hasta el fondo como sedimentos.

En las altas latitudes las aguas superficiales son casi tan frías como las profundas, por tanto la densidad depende en mayor medida de la salinidad. A esas latitudes, el aumento de la salinidad por evaporación o congelación produce incremento de la densidad y tendencia a la profundización de las aguas superficiales, formación de aguas profundas, elemento importante de la circulación termohalina.

La circulación termohalina explica la existencia de la termoclina y la temperatura observada de las aguas profundas. Obedece a las diferencias de densidad

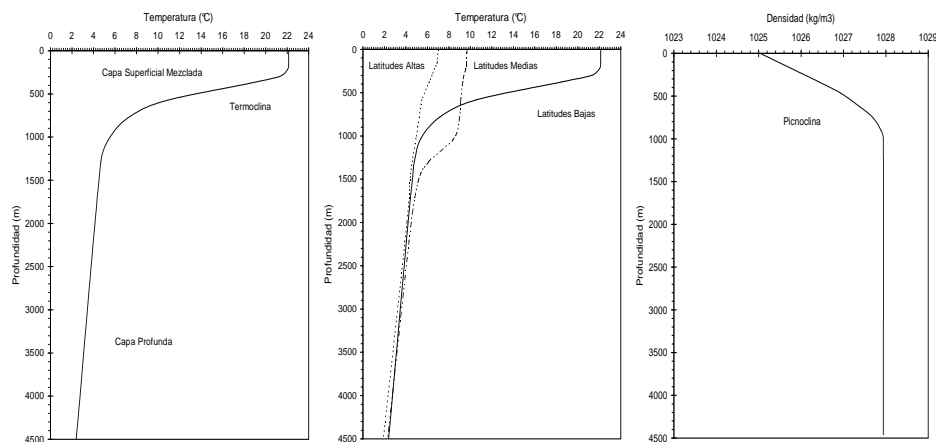


Figura 2.23: Izquierda: esquema del cambio de la temperatura del mar con la profundidad y de las principales capas. Centro: esquema de la variación de los perfiles de temperatura oceánica para diferentes latitudes. Derecha: esquema del cambio de la densidad con la profundidad.

que resultan del diferencial calentamiento horizontal en la superficie y de los cambios de salinidad que resultan de los intercambios de agua dulce: la evaporación y la formación de hielo aumentan la salinidad, la precipitación, la escorrentía continental y el derretimiento de hielo la disminuyen. Esta circulación puede mirarse como un gran volcamiento de las aguas oceánicas (Figura 2.24). Sus componentes fundamentales son [Rahmstorf, 2002]:

- La formación de aguas profundas. Masas de agua densa, fría o salina que se profundizan por convección y mezcla. Esto ocurre en unas pocas áreas muy localizadas: el Atlántico Norte en los mares de Groenlandia, Noruega y Labrador; el mar Mediterráneo, y el Antártico en los mares de Ross y Wedell.
- La propagación de las aguas profundas (NADW, agua profunda del Atlántico Norte; AABW, agua de fondo Antártica) principalmente como corrientes profundas de margen Oeste.
- Surgencia (ascenso) de las aguas profundas. Este flujo no es localizado y es difícil de observar. Se cree que ocurre principalmente en la corriente Circumpolar Antártica.
- Corrientes cercanas a la superficie, que se requieren para cerrar la continuidad. En el Atlántico estas corrientes incluyen la corriente de Bengala en África, la parte menos superficial de la corriente del Golfo y la corriente del Atlántico Norte.

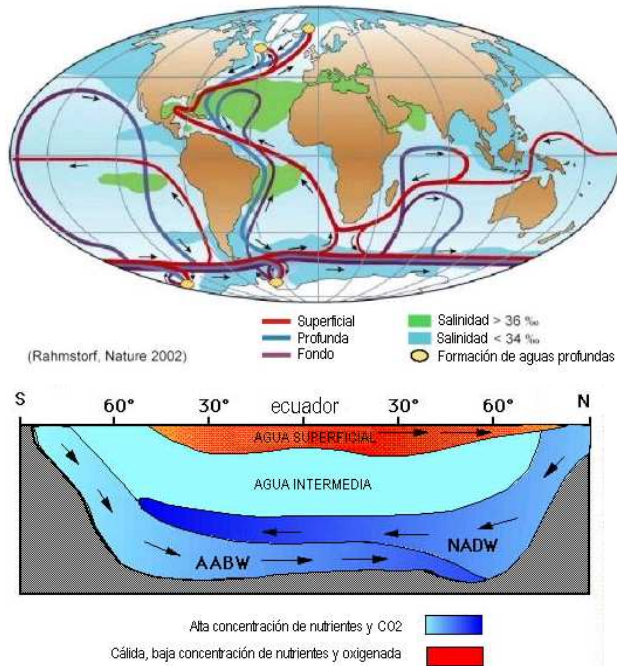


Figura 2.24: Panel superior: esquema de la circulación termohalina. Inferior: esquema de corte vertical de polo a polo por el Océano Atlántico a la derecha. Adaptada de Rahmstorf [2002]

El volumen de agua transportado por la circulación termohalina es inmenso. Roemmich and Wunsch [1985] estima con base en observaciones que por la latitud 24 N el flujo es 17 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), unas 100 veces el caudal del río Amazonas. El agua que fluye hacia el Sur es en promedio 8 K más fría que la que retorna superficialmente hacia el Norte, lo que corresponde a un transporte de calor de 1,2 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$). La circulación termohalina representa aproximadamente la mitad del transporte meridional de calor que realiza el océano.

Aunque parezca sorprendente, el mezclado turbulento que obtiene energía de las corrientes de marea es fundamental para que el volcamiento convectivo se desarrolle hasta el fondo [Robinson and Stommel, 1959]. El forzamiento térmico da origen a una circulación estacionaria sólo si el calentamiento ocurre a mayor profundidad que el enfriamiento (teorema de Sandström). A escala de tiempo larga, la difusión y el mezclado turbulento de calor hacia abajo, desde la termoclina, jalan la circulación termohalina. A escalas de tiempo menores, hasta siglos, la circulación es empujada por la formación de aguas frías.

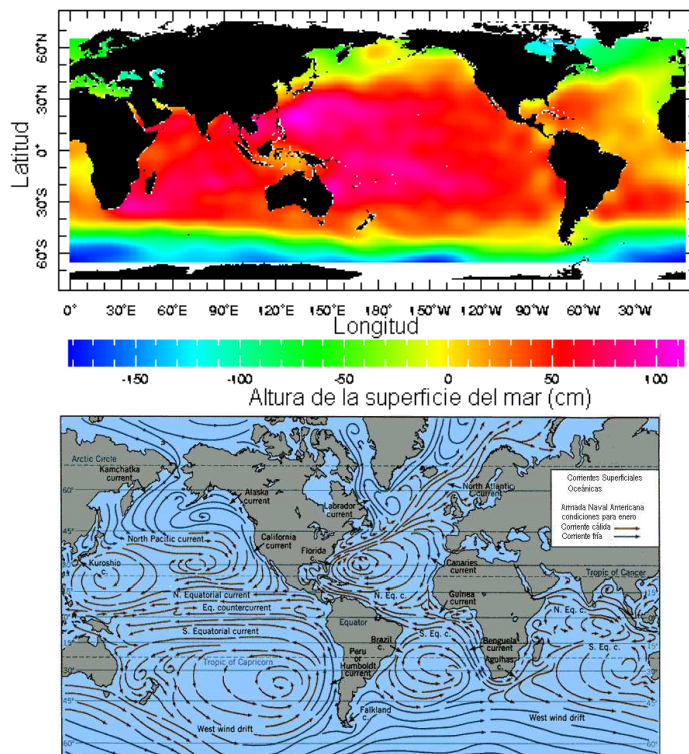


Figura 2.25: Mapa de la altura de la superficie del mar en la parte superior y abajo esquema de la circulación superficial inducida por vientos. NOAA, CIRES, CDC, <http://www.cdc.noaa.gov>.

Según lo descrito hasta ahora sólo se ha contemplado el origen térmico de esta circulación, hace falta considerar el efecto de la salinidad. En realidad, la circulación termohalina es más compleja y por la no linealidad que los efectos salinos introducen. Hay una retroalimentación positiva entre salinidad en la zona donde se forman las aguas profundas y la fortaleza de la circulación. De manera simplificada, la salinidad en las zonas de altas latitudes donde se forman las aguas profundas depende linealmente del flujo transportado desde las bajas latitudes de aguas cálidas y salinas por la circulación más superficial inducida por los vientos. Este flujo a su vez depende linealmente de la salinidad en las zonas donde se forman las aguas profundas. Esta combinación da origen a una dependencia cuadrática que produce una bi-estabilidad. Esta combinación de procesos también produce un ciclo de retroalimentación negativo porque las aguas transportadas de las bajas latitudes son cálidas y por tanto menos densas y tienden a debilitar la circulación termohalina.

Además del interés académico de este análisis, hay cierta evidencia de que en el pasado (miles de años o más) han operado ambos estados, incluso que la circulación haya estado inactiva. Ante el calentamiento global por efecto invernadero alguno de los escenarios incluye transiciones entre estados de esta circulación. Tanto el calentamiento de la superficie, como el incremento de los flujos de agua dulce que resultan de un ciclo hidrológico más activo apuntan a reducir la densidad de las aguas superficiales en las altas latitudes y por lo tanto la formación de aguas profundas. A escala un poco menor, décadas, su variabilidad puede estar afectando el clima global. Ambos aspectos serán discutidos en las respectivas secciones.

La circulación oceánica inducida por los vientos responde a las fuerzas de arrastre superficial que son proporcionales al cuadrado de la velocidad. Las diferencias de presión que resultan de diferencias de nivel de la superficie libre (ver Figura 2.25) o de densidad de la columna y la fuerza de Coriolis son ingredientes a considerar al estudiar esta circulación.

Las diferencias de nivel son a su vez resultado del efecto de arrastre de los vientos y de la dinámica completa de las corrientes. Por ejemplo en la Figura 2.25 se puede ver que a lo largo del Ecuador en el Pacífico el nivel del mar es menor en el Este cerca a Suramérica y mayor al Oeste cerca a Indonesia. Esto corresponde al patrón predominante de los vientos que en ambos hemisferios tiene importante componente del Este. Dicho equilibrio tiene consecuencias importantes, tanto que cuando se perturba produce cambios dramáticos de gran escala en el clima terrestre a escalas interanuales (ver Sección 2.6.2).

Algunas de las estructuras más importantes de la circulación inducida por los vientos son (Figura 2.25) los grandes giros en sentido horario en el Hemisferio Norte en el Atlántico y Pacífico, y las correspondientes en sentido antihorario en el Hemisferio Sur. Las corrientes de las márgenes occidentales de las cuencas oceánicas transportan aguas cálidas tropicales hacia las altas latitudes. Estas corrientes tienen un ancho típico de 50 km. De ellas son notorias la corriente del Golfo en el Atlántico y la Kuroshio en el Pacífico. En el Hemisferio Sur la corriente de Brasil y la corriente de Agulhas en África. En las márgenes orientales las corrientes transportan aguas frías de las altas latitudes hacia los trópicos. Frente a Suramérica es notoria la llamada corriente de Humboldt o de Perú. Cerca al Ecuador en cada hemisferio se tienen las corrientes ecuatoriales hacia el Occidente y entre ellas puede existir una contracorriente ecuatorial en sentido inverso, hacia el Oriente que es clara en el Pacífico.

Los giros están explicados por el sentido de la circulación atmosférica, los vientos alisios del Este en ambos hemisferios en las zonas tropicales y los vientos del Oeste en los extratropicos. La contribución de esta circulación a la redistribución de energía del sistema climático como resultado del gradiente entre el Ecuador y los polos es clara. Se considera que la única excepción

ocurre en el Atlántico Sur, donde el flujo predominante es hacia el Ecuador. La presencia de los continentes explica que no se formen circulaciones zonales completas, excepto en el Hemisferio Sur al rededor de la Antártida donde la corriente circumpolar es bien desarrollada.

Estas corrientes no son estacionarias, cambian de intensidad con la época del año y con los sistemas temporales de circulación atmosféricos. Su posición también sufre algunas variaciones.

Los patrones de circulación predominante tienen efectos sobre la temperatura superficial del mar que a su vez retroalimentan la circulación atmosférica. Por ejemplo, en las zonas tropicales, el extremo Oeste de las cuencas tiende a ser más caliente mientras que el Este a ser más frío. Parcialmente esto es explicado por el transporte de aguas de diferente temperatura por la circulación inducida por los vientos. También influye la circulación vertical que responde a la continuidad de masa y al efecto de Eckman. En las márgenes Este de las cuencas el transporte hacia el Oeste es parcialmente compensado por surgencia de aguas menos superficiales, por tanto más frías. La termoclina allí es más superficial. En las márgenes Occidentales por el contrario la temperatura es mayor y la termoclina es más profunda. La Figura 2.21 ilustra claramente este efecto. Sobre aguas cálidas es más propenso el desarrollo de la convección atmosférica, mientras que sobre aguas frías es más propenso que los vientos sean descendentes. En consecuencia las costas occidentales tropicales tienden a ser más secas (la excepción en el caso de la costa Pacífica colombiana es notoria). Esta retroalimentación es importante para la variabilidad interanual en el Pacífico.

El océano está acoplado con la atmósfera a través de los flujos de momentum, calor y agua. Estos dos últimos muy ligados a la temperatura superficial del mar. También es importante el intercambio de gases, en particular el CO_2 . En la variabilidad climática estas interacciones juegan un papel central.

2.5. Sensibilidad y Retroalimentación

La comprensión y la predicción de los efectos del cambio climático son un gran desafío por la complejidad de las interacciones entre las componentes del sistema climático que involucran procesos físicos, químicos y biológicos, a diferentes escalas espaciales y temporales. Además estas interacciones no son simples y abiertas, sino que se retroalimentan. Los efectos vuelven a influir sobre las causas. De hecho, siempre se habla de ciclos: ciclo hidrológico, ciclo del carbono, ciclo energético, etc. Una estrategia que ha sido muy popular, teniendo en cuenta el desarrollo en la capacidad de computación, ha sido la de producir modelos globales acoplados que buscan incluir todos las componentes

del sistema climático. Esa estrategia tiene sus ventajas y es posible hacer experimentos bien diseñados con estos modelos para avanzar en el conocimiento y la predicción de los cambios climáticos.

Sin embargo, es necesario considerar modelos simples para avanzar en el entendimiento y para aportar al diseño de los modelos complejos. La motivación original de estas preguntas proviene del estudio de las consecuencias del calentamiento global por efecto invernadero como resultado del aumento de la concentración de CO₂ atmosférico. ¿Existen en el sistema climático mecanismos que permitan absorber esta perturbación antrópica? O por el contrario, ¿hay mecanismos amplificadores que puedan desestabilizar el clima y llevarnos a situaciones catastróficas? Como el sistema climático es complejo, no lineal y caótico, las preguntas son no sólo pertinentes sino de la mayor dificultad. En principio, por el conocimiento actual sobre este tipo de sistemas caben muchas posibilidades: dependencia de condiciones iniciales, bifurcaciones en función de los parámetros y multiplicidad de regímenes. Las fuentes principales de esta sección son Hartmann [1994; cap. 9] y Stocker et al. [2001].

Para precisar nomenclatura es útil pensar en un sistema en términos de estímulo–respuesta, o del concepto de función. Es decir se distingue, así sea mentalmente, las entradas de las salidas. Es posible que no se tenga conocimiento detallado de cómo el sistema transforma las entradas en salidas, pero existe posibilidad de observar o medir las entradas y las salidas (su magnitud). Los sistemas simples o lineales se caracterizan porque la entrada es independiente de la salida. En sistemas complejos o con ciclos, la salida afecta a la entrada, retroalimenta el sistema. Se entiende por sensibilidad de un sistema a una entrada la relación entre la magnitud de la respuesta a la magnitud de la entrada. En un sistema con ciclos, se dice que un mecanismo de retroalimentación cambia la sensibilidad del sistema.

Existen mecanismos de retroalimentación positivos y negativos. En el primer caso el mecanismo refuerza, aumenta la magnitud de la respuesta. En el segundo caso la disminuye. Los sistemas con retroalimentaciones negativas tienden a equilibrarse, a regularse. Los sistemas con retroalimentaciones positivas tienden a ser inestables. En los sistemas complejos coexisten diversos mecanismos de retroalimentación, de signos diferentes. La magnitud de un mecanismo de retroalimentación también puede cuantificarse. Un ejemplo sencillo de un mecanismo de retroalimentación negativo es el regulador de las primeras máquinas de vapor: para estabilizar la frecuencia de las revoluciones de giro en una turbina, se dotaron de unos brazos articulados en su extremo superior y libres en el otro extremo, en el cual tienen una masa. Si la turbina gira muy rápido, los brazos se extienden (abren) por la fuerza centrífuga y el momento de inercia aumenta frenando la turbina. Por el contrario, los brazos permanecen cerrados si gira muy lento, lo cual da poco momento de inercia y permite a la turbina

ganar velocidad de rotación. Otro ejemplo es el termostato en un refrigerador: un sensor que cuando la temperatura es menor que un cierto valor abre un circuito que apaga el compresor. Cuando la temperatura sube y excede el valor prefijado, el circuito se cierra y arranca el compresor.

En el sistema climático abundan los mecanismos de retroalimentación. Ejemplos de retroalimentación positiva son la relación hielo–albedo a nivel planetario; la relación calentamiento–efecto invernadero del vapor de agua; la relación entre el gradiente de temperatura superficial del mar a lo largo del Ecuador en el Océano Pacífico y la intensidad de la circulación atmosférica de la celda de Walker; la relación entre éstas dos características del Pacífico tropical y la profundidad de la termoclina en la misma zona; La relación entre la salinidad del Océano Atlántico y la magnitud de la circulación termohalina, la relación entre la magnitud del transporte meridional de calor por los remolinos y el gradiente meridional de temperatura. Ejemplos de mecanismos de retroalimentación negativa son el enfriamiento por emisión de radiación de onda larga; el enfriamiento por evaporación; el aumento del albedo por las nubes (también tiene efecto positivo por efecto invernadero); el efecto de la biosfera sobre la composición de la atmósfera [Hartmann, 1994].

Cada uno de estos mecanismos merece un análisis más detenido y una cuantificación. La importancia de estos estudios es mayor cuando se piensa en el escenario del calentamiento global. De hecho, esta ha sido la motivación fundamental para tales consideraciones. A continuación se presenta una breve consideración de los principales. Algunos son tratados con mayor detalle en el Capítulo 3 relativo al cambio climático.

Del modelo radiativo más simple se puede deducir el mecanismo de retroalimentación por enfriamiento radiativo. La respuesta a una perturbación que produzca calentamiento será mayor emisión como cuerpo negro, es decir un tendencia a enfriamiento, una retroalimentación negativa. Sin considerar el resto de efectos indirectos, la sensibilidad por enfriamiento radiativo se puede cuantificar de la Ecuación 2.1 de la pág. 23 como $0,26 \text{ K (W m}^{-2}\text{)}^{-1}$. Es decir un forzamiento de 1 W m^{-2} produce por efecto de enfriamiento radiativo un cambio en la temperatura de 0,26 K. Por ejemplo, considerando constante el albedo, para producir un incremento de 1 K en temperatura se requiere un cambio de 22 W m^{-2} en la constante solar, aproximadamente un 1,6%. Los cambios de temperatura observados mediante registros indirectos en el cuaternario (últimos 2 millones de años) son mayores, y están descartados cambios de tal magnitud en la constante solar. Por tal razón es claro que se requieren otros mecanismos de amplificación (retroalimentación positiva) para producir los cambios observados.

El efecto del vapor de agua en la atmósfera como gas invernadero produce un mecanismo poderoso de retroalimentación. A mayor temperatura el aire tiene

exponencialmente mayor capacidad de contener vapor de agua (ver Figura 2.4). Como buena parte de la superficie terrestre está cubierta por mar y en buena parte del año hay suficiente humedad en los suelos de buena parte de las zonas continentales, están dados los elementos para que la cantidad de vapor en la atmósfera (humedad) aumente con la temperatura. A su vez, el vapor de agua es excelente gas de invernadero y por tanto produce calentamiento adicional en la superficie por esta vía. Sin embargo la evaporación necesaria para aumentar la humedad también produce enfriamiento en la superficie por flujo de calor latente.

Para efectos de análisis se considera primero el efecto invernadero. De la ecuación de Clausius-Clapeyron es posible deducir que, en las condiciones promedio en la superficie terrestre, el cambio relativo de la humedad de saturación es igual a 20 veces el cambio relativo en la temperatura. Por lo tanto el efecto de un incremento de 1 % en la temperatura (aproximadamente 3 K) produce un aumento del 20 % en humedad de saturación. Sin embargo, el aumento de la capacidad máxima de almacenamiento no necesariamente implica que la humedad se incremente, dado que en términos generales la mayoría de la atmósfera no está saturada. La evaporación es un mecanismo bastante eficiente para mantener la humedad relativa (relación entre la humedad y la humedad de saturación) relativamente constante a pesar de los grandes cambios estacionales de temperatura en las latitudes medias y altas. Este análisis es claro para la capa límite atmosférica (hasta una altura de 1 a 2 km).

En la atmósfera libre, no es posible definir a partir de argumentos termodinámicos simples cuál sería el efecto en la humedad producto de un incremento de temperatura. Si se considera un modelo simple de equilibrio radiativo ajustado por la convección (ver Sección 2.2.3) en el que se incluye el efecto de enfriamiento por emisión de onda larga, el efecto radiativo de las todas las componentes de la atmósfera y por tanto la retroalimentación por vapor de agua, se estima que la sensibilidad pasa a ser $0,5 \text{ K (W m}^{-2}\text{)}^{-1}$ [Hartmann, 1994]. Es decir el efecto del vapor de agua duplica la sensibilidad del sistema climático.

Sin embargo, consideraciones más recientes [Stocker et al., 2001; pág. 423] indican que la retroalimentación por el efecto invernadero del aumento en la concentración de vapor de agua depende en gran medida de la altura a la cual se produce el incremento y sólo es importante si donde se produce el incremento tiene temperatura por debajo de la temperatura de la superficie. Su impacto crece marcadamente a medida que la diferencia de temperatura aumenta. La humedad en la troposfera libre depende de varios procesos dinámicos y microfísicos, incluyendo las nubes, sobre los cuales todavía no hay consenso. Las diferencias entre como se representan estos procesos en los modelos da origen a la mayor dispersión en las estimaciones del efecto del calentamiento global. Un punto clave parece ser el cambio en el área de las zonas de convección tropi-

cal profunda. Otro punto importante es la magnitud del gradiente vertical de temperatura en las zonas tropicales. A mayor decrecimiento de la temperatura con la altura mayor efecto invernadero.

El hielo tiene un mecanismo de retroalimentación positivo importante por el cambio de albedo. Una disminución de temperatura que alcance a aumentar la superficie cubierta de hielo produce un aumento importante de albedo, por tanto aumento de la radiación solar reflejada, disminución de la radiación solar absorbida y mayor disminución de la temperatura. Este efecto probablemente jugó un papel importante en los ciclos de glaciaciones. Es tan fuerte este mecanismo de retroalimentación hielo-albedo, que algunos modelos simples [Budyko, 1969] para cuantificarlo producen muy alta sensibilidad, inestabilidad y la posibilidad de una Tierra totalmente congelada o libre de hielo con cambios pequeños en el forzamiento radiativo. Consideraciones más modernas de este tipo de modelos que incluyen parámetros más reales producen una situación menos inestable. De este análisis se deduce que la retroalimentación hielo-albedo a pesar de ser importante, no alcanza a producir por sí sólo los ciclos de glaciación que se deducen del registro paleoclimático.

La atmósfera y el océano son eficientes para transferir energía de las zonas tropicales donde hay exceso de radiación hacia las zonas polares donde hay déficit. Estos flujos en general son función del gradiente meridional (en dirección norte-sur) de temperatura. Mediante argumentos dimensionales es posible determinar que en las latitudes medias los remolinos transportan energía en la atmósfera a una tasa proporcional al cuadrado de este gradiente y proporcional a la raíz cuadrada del gradiente vertical. En consecuencia los remolinos son mecanismos muy eficientes para reducir los gradientes de temperatura entre el Ecuador y los polos. Estudios numéricos con modelos de circulación global confirman este análisis. Aunque para el océano no se tiene forma semejante para cuantificar la respuesta, se considera que de manera semejante existen mecanismos eficientes de transferencia meridional de energía. Sin embargo, de los registros paleoclimáticos se infiere que durante los ciclos glaciares la temperatura en los mares ecuatoriales sólo cambió unos cuantos grados, mientras que en las altas latitudes el cambio fue sensiblemente mayor. Esta discrepancia entre las observaciones y el análisis no está explicada, probablemente es necesario considerar procesos superficiales y de la capa límite.

El efecto de enfriamiento de la superficie del mar por evaporación probablemente tiene un papel en la estabilidad de la temperatura de los mares tropicales que se puede deducir de los registros paleoclimáticos. Ya habíamos indicado que el vapor de agua es un gas invernadero y tiene por tanto un efecto de retroalimentación positivo importante, pero habíamos dejado pendiente el efecto de enfriamiento por calor latente. Si se hace un balance energético de la superficie incluyendo el efecto invernadero de las diferentes componentes de la atmósfera

(incluyendo el vapor de agua y su variabilidad con la humedad), la radiación solar absorbida, el enfriamiento por emisión de onda larga de la superficie, y el enfriamiento por evaporación bajo la hipótesis de que la humedad relativa es proporcional a la presión atmosférica, se llega a resultados importantes.

Primero, el efecto invernadero (calentamiento superficial) en función de la temperatura de la superficie crece fuertemente para temperaturas mayores a los 300 K. Esto se debe a que al aumentar la humedad, varias moléculas de vapor se asocian y actúan en conjunto para prácticamente bloquear la radiación de onda larga emitida por la superficie.

Segundo, el enfriamiento por evaporación depende débilmente de la temperatura, pero es casi el doble del efecto de calentamiento por efecto invernadero del vapor de agua. Considerados conjuntamente, el efecto invernadero del vapor de agua y el enfriamiento por evaporación, la sensibilidad se estima en $0,3 \text{ K (W m}^{-2}\text{)}^{-1}$ [Hartmann, 1994]. Este valor es más bien bajo, lo cual podría explicar la estabilidad de la temperatura superficial del mar tropical (rango de temperatura al cual se aplica el análisis). La cuantificación anterior es sensible a la hipótesis sobre la humedad relativa.

Para las condiciones tropicales, el efecto sobre la evaporación de un incremento de un grado en la temperatura es aproximadamente igual y en sentido contrario a un incremento de 1 % en la humedad relativa. Esto indica que los procesos que controlan la humedad relativa en la capa límite tropical son extremadamente importantes para determinar la sensibilidad del clima.

Las nubes cubren aproximadamente el 50 % del área terrestre. Uno de sus efectos es el aumento del albedo y por tanto enfriamiento. Se estima que el albedo de la Tierra sería aproximadamente 15 % si no hubiera nubes, por su existencia duplica el albedo total (enfriamiento estimado de 40 a 50 Wm^{-2}). Las nubes también absorben radiación solar, lo que modifica la distribución vertical de temperatura. Además, las nubes también tienen efecto invernadero y por tanto calientan (estimado en 30 a 35 Wm^{-2}). El efecto de una nube depende de su altura, espesor, tipo y composición.

El efecto neto de retroalimentación de las nubes ante el calentamiento global sigue siendo muy incierto, incluso en su signo. La estimación actual es del orden de $\pm 3 \text{ Wm}^{-2}$, lo que es una fracción menor de su efecto de enfriamiento o de calentamiento. Este desconocimiento repercute en incertidumbre sobre las predicciones de la magnitud del calentamiento y además sobre los efectos sobre precipitación y disponibilidad de agua que son de igual o mayor importancia práctica. Además de los puntos señalados respecto al efecto del vapor de agua, son de importancia los cambios en ubicación espacial y temporal de las zonas cubiertas y libres de nubes.

Entre los mecanismos de retroalimentación que se han mencionado antes vale la pena recordar los asociados a la circulación termohalina. Algunos autores han

sugerido la posibilidad de que el calentamiento [Broecker, 1995] pueda producir un paro abrupto de la circulación termohalina como resultado de incremento en el flujo de agua dulce y temperatura en la zona de producción de agua profunda del Atlántico Norte. Las consideraciones más recientes [Stocker et al., 2001] no son tan dramáticas, pero sí se ve posible una reducción.

2.6. Variabilidad climática

Una de las características más importantes del sistema climático es su variabilidad. De un lugar a otro y de una época a otra el clima presenta gran riqueza en su repertorio. En cierta manera por tal razón tenemos dificultad en su predicción. Por otro lado, de tal variabilidad también resultan oportunidades prácticas, tiempo para las actividades y para descansar, épocas de siembra y de cosecha y algunas veces amenazas. Entender la variabilidad es en buena medida entender el clima.

La cuasi-periodicidad astronómica es una primera fuente de variabilidad. El ciclo diurno, las estaciones, el ciclo semianual en los trópicos y el ciclo anual son características prominentes del clima. A escalas mayores hay variabilidad interanual, interdecenal, secular y milenaria. Algunas de estas parece estar relacionadas con variaciones de baja frecuencia en la insolación solar, debidas a cambios en los parámetros orbitales terrestres. Otras parece se deben a oscilaciones propias del sistema climático.

La atmósfera en particular tiene un tiempo de respuesta menor y da origen a oscilaciones caóticas a diversas frecuencias, contribuyendo a la variabilidad en todas las escalas. Los procesos en las otras esferas tiene escalas de variabilidad temporal mayor. Por ejemplo, la interacción océano-atmósfera en el Pacífico tropical da origen a una importante variabilidad interanual, con períodos entre 3 y 6 años que afectan el clima global y que se conoce como El Niño-Oscilación del Sur (siglas en español ENSO).

A grandes escalas de tiempo, de los registros paleoclimáticos se ha podido reconstruir una historia de gran variabilidad, con ciclos de glaciaciones en los que han jugado papeles además de la insolación, mecanismos de retroalimentación importantes, como hielo-albedo y ciclos de CO₂. Para tener capacidad de entender y predecir cambios climáticos futuros de origen antrópico es fundamental estudiar la variabilidad natural. A continuación se presenta un recorrido por los principales actores de la variabilidad climática.

2.6.1. Breve historia del clima de la Tierra

La historia del clima de la Tierra es muy fragmentaria, a pesar de los admirables esfuerzos de la Geología, la Paleontología y demás disciplinas relacionadas,

para buscar registros indirectos y para interpretarlos. Entre los grandes avances está la capacidad de datar depósitos, lo cual ha permitido reproducir historias de indicadores indirectos de variables climáticas en sedimentos, en anillos de árboles, en fósiles de microorganismos marinos como las foraminíferas y los corales, en fósiles de polen, en la composición isotópica de oxígeno, hidrógeno y otros elementos en las capas de hielo, o mediante el estudio de la concentración de gases en el aire atrapado en esos depósitos. Mientras más atrás en el tiempo, menos confiable y detallados son los registros. Sin embargo hay alguna evidencia que está firmemente apoyada en observaciones y en teoría. La Tierra tiene una edad estimada de cuatro mil seiscientos millones de años (4 600 Ma). La primera evidencia de vida unicelular procariótica se remonta a hace unos 4 000 Ma. Las células eucarióticas tardaron otros 600 Ma, los primeros organismos pluricelulares tardaron después de esto otros 1 200 Ma más, y el hombre sólo apareció hace unos 2 Ma.

Sobre la Tierra joven [de los orígenes hasta hace unos 1000 Ma] sabemos que el Sol era 30 % menos luminoso que ahora, que la atmósfera primaria se escapó por algún evento no determinado. Luego se formó una atmósfera secundaria por liberación paulatina de gases atrapados en el interior, siendo los más importantes vapor de agua, nitrógeno y dióxido de carbono. Esta degasificación, a través de volcanes y otros mecanismos todavía continua. Según la distancia de la Tierra al Sol, y a diferencia de Marte y Venus, las temperaturas en la Tierra en aquel entonces estaban cerca al punto triple del diagrama de fases del agua. Así el vapor se pudo condensar, se formaron los mares, el CO₂ se equilibró con el mar y con las rocas carbonatadas. Apareció la vida y la fotosíntesis produjo oxígeno molecular y una atmósfera más parecida a la actual. Se desarrolló la capa de ozono y el clima se estabilizó de alguna manera.

De los últimos 1000 Ma se sabe que había agua líquida, hay múltiples registros de fósiles de organismos que vivieron durante esa época y en varios ocasiones hubo glaciaciones. La posición de los continentes no es clara sino para los últimos 500 Ma. En el Precámbrico tardío (−600 Ma) hay evidencia de un período glaciario, luego otro más extendido en el Paleozoico tardío (−300 Ma) y finalmente otro más reciente en el Cenozoico (últimos millones de años) del cual hay evidencia mucho más detallada. La última glaciación del Paleozoico parece haber ocurrido cuando África, Australia, Suramérica y Antártica estaban unidos y cerca al Polo Sur. Hace aproximadamente 300 Ma estos continentes empezaron a separarse y a migrar lentamente hacia sus posiciones actuales.

El período libre de glaciaciones más estudiado es el Cretáceo Medio [entre 120 y 90 Ma antes del presente]. El Océano Atlántico casi no existía, Europa y Norte América estaban muy cerca, igual que África y Sur América, India era una isla, Australia todavía estaba pegada a Antártica, había un mar tropical que se extendía prácticamente a lo largo del Ecuador llamado el Mar de Tétis. El

nivel del mar estaba 100 m por encima a lo actual, había plantas hasta latitudes 15° más cerca a los polos de su posición actual. Hay abundante evidencia de que el clima era más cálido que el actual. Durante este período se formaron los depósitos de carbón y petróleo que hoy se explotan. La temperatura de las aguas profundas se estima entre 15 y 20°C . Se considera que la explicación para este clima tan cálido es el efecto invernadero. De estudios de los suelos de la época se estima que los niveles de CO_2 podrían ser hasta 4 veces los actuales, aunque no hay evidencia directa, concluyente de la concentración atmosférica. También hay evidencia de alta actividad volcánica, que podría explicar la alta concentración de CO_2 .

El Cretáceo terminó bruscamente con lo que se ha denominado la frontera K-T (abreviatura de Cretáceo-Terciario en Inglés) que hoy se considera fue producida por el impacto de un gran meteorito que derivó en la extinción de diversas especies, entre ellas los dinosaurios. La abundancia en los depósitos de la época de iridio, un elemento muy escaso en la tierra y abundante en los meteoritos es una de las evidencias más fuertes para soportar esta teoría.

Hay registros que indican que durante el Cenozoico (-50 Ma) la Tierra se enfrió gradualmente a pesar del lento incremento en la luminosidad solar, los gradientes latitudinales se aumentaron, hubo mayor variabilidad y estacionalidad y se culmina con ciclos de glaciación. En algunos fósiles de comienzo del Cenozoico se encuentra indicio de concentración atmosférica de CO_2 del orden del doble de la actual. Los continentes se separaron de la Antártica, se desarrolló la circulación circumpolar en el Océano Ártico, las aguas del mar se enfriaron más de 10°C . Hay fósiles de polen que indican la presencia de bosque en Antártica hasta hace unos 20 Ma. La glaciación empezó allí hace 14 Ma hasta alcanzar los volúmenes actuales hace aproximadamente 5 Ma. Es una época de intensa actividad tectónica, vulcanismo, meteorización de rocas e importante evolución biológica: aparición de vegetación angiosperma, de las gramíneas y de organismos pelágicos en el mar. Todos estos factores con efectos importantes sobre la concentración del CO_2 atmosférico que pueden explicar su disminución progresiva y los ciclos al final del período, en el cuaternario.

El clima del Cuaternario (-2 Ma) está caracterizado por los ciclos de glaciaciones. Al final del Pleistoceno (0,9 Ma) hubo una transición de una periodicidad de cuarenta y un mil años (41 ka) a una de 100 ka. Además, los ciclos eran de menor amplitud antes de la transición. De los registros indirectos se deducen períodos de 480 mil, 100 mil, 41 mil y 23 mil años. La teoría más aceptada para explicar estos ciclos los asocia a cambios en la insolación asociados a variaciones orbitales. El último ciclo tiene un mínimo de hielo hace 125 mil años y un máximo hace 20 mil años. Sobre los continentes hubo capas de 3 a 4 km de espesor. El peso de estas capas produce deformación continental de hasta 1 km. Todavía se experimenta el llamado rebote elástico, aumento del nivel en

el norte de Europa y Norte América resultado de la liberación de la carga de la capa de hielo. Hay además registros de cambios paralelos en el nivel del mar y en la concentración de gases de invernadero, CO_2 y metano, probablemente asociados a cambios en la productividad biológica de los océanos.

También hay evidencia de cambios en la circulación termohalina de aguas profundas. En el máximo de la última glaciación la llamada banda transportadora estaba muy debilitada, se reinició hace 14 mil años, pero cesó nuevamente entre 13 y 11 mil años atrás. Esto coincide con un período frío en la zona costera del Atlántico norte en Europa y Norte América, conocido como el Younger Dryas. Una teoría explica este súbito enfriamiento como una consecuencia del cambio en la dirección de la aguas producto del derretimiento de la capa de hielo de Laurentide que inicialmente tomaba rumbo Sur por el río Misisipí. A medida que el hielo se retiraba hacia el Norte creó varios lagos entre ellos el lago Agassiz y eventualmente el glaciar empezó a drenar por el estrecho que hoy corresponde al río San Lorenzo hacia el este, lo cual se data hace 12 mil años. El suministro de agua dulce, por tanto menos densa, a tal latitud suprimió la producción de aguas profundas. Se estima que hace 11 mil años se recuperó la circulación termohalina.

El clima se calentó en los últimos 10 mil años, después del máximo de la última glaciación. El derretimiento tomó unos 7 mil años (desde hace 14 000 hasta hace 7 000 años). La evidencia hidrológica de lagos cerrados indica que África era más húmeda hace 9 a 6 mil años. Esto está registrado en fósiles de cocodrilos y de hipopótamos en el Sahara. Los Monzones eran también más intensos. Menores avances de glaciares se ubican hace 5 300, 2 800, y de 150 a 600 años (la pequeña edad de hielo).

Los ciclos de glaciaciones se han explicado de varias maneras, entre ellas la más aceptada es la teoría astronómica de las Glaciaciones.

La insolación media anual para toda la Tierra varía únicamente en función de la excentricidad de la órbita, e , en proporción a $(1-e^2)^{-1/2}$, que para los valores de la órbita terrestre ($e < 0,06$), produce cambios que parecen muy pequeños para ser importantes. La oblicuidad Φ , controla el gradiente anual medio de insolación entre el Ecuador y los polos, y juntamente con la excentricidad y la longitud del perihelio Λ , controlan la amplitud de la oscilación estacional en un punto. El parámetro de precesión $e \sin \Lambda$, puede producir cambios de hasta un 15 % en la insolación de verano en latitudes altas. El efecto combinado de los tres parámetros orbitales puede traer cambios en la insolación estacional de hasta 30 %, en latitudes altas. La mecánica celeste permite la reconstrucción de los parámetros orbitales hacía el pasado y el futuro.

La variación de la excentricidad tiene períodos de 100 mil y 400 mil años. Actualmente tiene un valor de 0,015 que es bajo, comparado con los máximos de 0,055 que se tuvieron hace 200 mil y 600 mil años. La oblicuidad tiene un

período dominante de 40 mil años y actualmente tiene un valor intermedio entre el máximo (24,5) y el mínimo (22,5). La longitud del perihelio tiene un período dominante de 26 mil años, pero su efecto aparece combinado con la excentricidad.

De acuerdo con la teoría de Milankovich, las glaciaciones se presentan cuando la insolación en latitudes altas del Hemisferio Norte en verano son bajas como para que la nieve siempre presente en invierno no se alcance a derretir y se forme un proceso de acumulación.

Hace 23 mil años, cuando la glaciación se incrementó rápidamente, el parámetro de precesión era grande y negativo y la oblicuidad estaba cerca del mínimo. Actualmente estamos en un período interglacial (a pesar de Groenlandia y Antártida), por alta insolación en el Hemisferio Norte, como resultado de oblicuidad alta y parámetro de precesión positivo y grande. Esto coincide con lo que ocurrió hace 10 mil años.

2.6.2. Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur

De manera recurrente, con frecuencias aproximadas de una vez cada 4 años se presentan perturbaciones importantes en el clima que tienen duración aproximada de un año. El patrón de cambios incluye aguas superficiales anormalmente calientes en el Océano Pacífico tropical, presión atmosférica anormalmente baja (alta) en Tahiti (Darwin), precipitaciones extraordinarias en la costa tradicionalmente seca de Perú, norte de Chile y sur de Ecuador, mayor precipitación en regiones de Norteamérica, sureste de Suramérica y África ecuatorial; sequías prolongadas en Indonesia, norte de Australia, el este de Sudáfrica, regiones de la India (falla del monzón) y China, el Caribe y el norte de Suramérica.

A fines del siglo XIX se descubrió que tales perturbaciones estaban asociadas a un cambio en una celda de circulación zonal a todo lo largo del Océano Pacífico ecuatorial, que hoy se conoce como la circulación de Walker, en honor a Sir Gilbert Walker quien denominó a este patrón de teleconexiones con el nombre de Oscilación del Sur y que desarrolló un conjunto de modelos estadísticos para hacer predicciones climáticas en algunas de las regiones señaladas. A mediados del siglo XX se reconoció que tal perturbación estaba asociada a un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del este del Pacífico tropical. En Perú, tal calentamiento se conocía como el fenómeno del El Niño, por su ocurrencia en la época de navidad.

Al final de la década de 1960 se formuló la primera teoría en la cual se ligaban estos fenómenos y explicaba su ocurrencia [Bjerknes, 1969], que se debe a una oscilación natural del sistema climático, centrada en el Océano Pacífico tropical que se conoce hoy con las siglas ENSO. El fenómeno ENSO significó la

aceptación de la importancia de la interacción entre la atmósfera y el océano. De manera tradicional, los meteorólogos habían tomado las temperaturas superficiales del mar como condición de borde inferior, lo cual es justificado para escalas de tiempo muy cortas pero ignora que los vientos juegan un papel importante en la determinación de éstas. Los oceanógrafos, de manera similar, habían tomado los vientos como una condición de frontera superior impuesta externamente, sin tener en cuenta que los gradientes de temperatura son mecanismo fundamental para la producción de los vientos. Esta interacción mutua es más clara e importante en los trópicos y la zona ecuatorial y a escalas de tiempo mensuales o mayores.

ENSO es la fluctuación natural más fuerte a escala interanual. Asociado a esta oscilación se presenta variabilidad a nivel global que no está circunscrita únicamente a la cuenca tropical del Pacífico. El mecanismo cómo estas perturbaciones viajan a grandes distancias es mediante cambios en la circulación atmosférica, asociados a la generación de ondas planetarias, cambios en el momento angular y en la ubicación de las zonas de gran liberación de calor latente. A escala decenal se presentan oscilaciones semejantes a ENSO, conocidas como la oscilación decenal del Pacífico.

Para comprender el fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) es necesario primero explicar la condición normal del sistema océano- atmósfera en el Pacífico tropical. Existe sobre el Pacífico tropical una circulación térmica, la circulación de Walker, con alta presión atmosférica en el Este (representada por la estación en Tahiti) y baja presión en el Indonesia y el norte de Australia (representada por la estación en Darwin). La diferencia de presiones produce vientos superficiales del este, que concuerdan con, y refuerzan los alisios del noreste en el hemisferio norte y del sudeste en el hemisferio sur y que confluyen en la zona de convergencia intertropical. Dichos vientos empujan el agua oceánica superficial hacia el oeste mediante esfuerzos de Reynolds. Como resultado del equilibrio dinámico se obtiene la corriente ecuatorial hacia el oeste y las diferencias en la temperatura superficial, nivel del mar y profundidad de la termoclina entre el Este y el Oeste (respectivamente 4 °C mayor, 40 cm más bajo y 150 m más profunda en el Oeste).

La lengua de aguas frías en el este del Pacífico ecuatorial se explica por la surgencia de aguas más profundas y frías por efecto del bombeo de Ekman y por conservación de masa ante el empuje de los vientos del este, y por la cercanía a la superficie de la termoclina. La zona de aguas cálidas en el Oeste del Pacífico tropical denominada la piscina caliente se explica también por la acumulación de las aguas empujadas por los vientos del este y que se han calentado por absorción de radiación durante su trayectoria. También se puede decir que esta diferencia de temperatura es la que produce la circulación de Walker en la atmósfera, que corresponde a una circulación térmica directa.

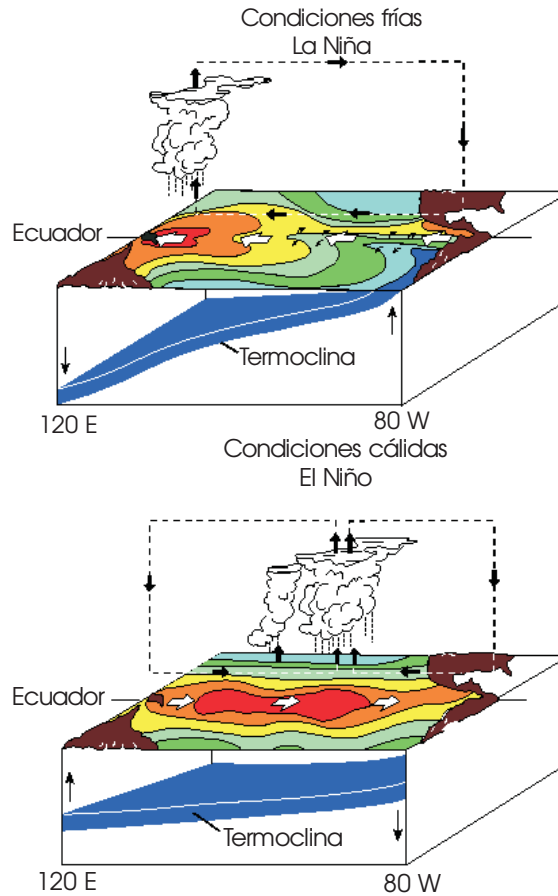


Figura 2.26: Esquema de las fases extremas del fenómeno ENSO en el Pacífico tropical: condiciones frías o La Niña (arriba) y cálidas o El Niño (abajo). Se ilustra la dirección predominante de los vientos, la distribución típica de la temperatura superficial del mar, la ubicación de las zonas de convección, la profundidad de la termoclina, las corrientes oceánicas y la intensidad de la surgencia de las aguas profundas. Adaptada de <http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/nino-home.html>

El aire asciende sobre las aguas cálidas del Pacífico Oeste, fluye hacia el Este en la alta troposfera, y desciende sobre las aguas frías del Pacífico Este. La diferencia entre las afirmaciones corresponde a cual es el énfasis en el análisis de la interacción océano-atmósfera. La circulación de Walker es acompañada por lluvias torrenciales en el Oeste y clima predominantemente seco en el Este de la cuenca del Océano Pacífico tropical. La retroalimentación positiva, que acabamos de describir, entre el océano y la atmósfera puede eventualmente debilitarse e incluso invertirse, lo cual sucede durante los eventos ENSO. La

Figura 2.26 presenta un esquema de las condiciones típicas en las fases extremas de esta oscilación.

El Niño (EN) representa la componente oceánica de dicha oscilación, que corresponde a un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del Este de la cuenca del Pacífico tropical. Normalmente por el ciclo anual de insolación las temperaturas allí se incrementan durante febrero a marzo en aproximadamente 4 °C. Cuando hay un evento EN este incremento es superior y tiene mayor duración. Estos eventos ocurren aperiódicamente entre dos y diez años y coinciden en fase con el ciclo anual, son amplificación del ciclo anual. Los cambios oceánicos van acompañados de cambios atmosféricos, la llamada Oscilación del Sur (SO), que corresponde a cambios en la masa atmosférica entre el Este y el Oeste de la cuenca Pacífica, con el correspondiente cambio en la presión atmosférica (sube en el centro y el Este, mientras baja en el Oeste), en la intensidad de la circulación (se debilitan los vientos superficiales del Este) y en la dirección de los vientos (puede invertirse en algunas regiones) y en la ubicación de las lluvias predominantes (se desplazan hacia el centro y el Este). Estos cambios se reflejan a su vez en cambios en el nivel del mar (sube en el Este) y la profundidad de la termoclina (se profundiza en el Este). Mayores detalles en [Diaz and Markgraff, 1993; Glantz et al., 1991; Hastenrath, 1991]. La dinámica completa se puede resumir en la interacción entre dos ciclos de retroalimentación, uno más rápido y positivo que da comienzo y refuerza la fase cálida y otro más lento y negativo que amortigua las anomalías positivas y las reversa. En ambos hay componentes atmosféricas, oceánicas que interactúan. El ciclo de retroalimentación positivo y rápido incluye la reducción de la diferencia en la temperatura superficial entre el Oeste y el Este por calentamiento en el Este, lo que produce cambio en la zona de mayor precipitación y en la localización de la zona de mayor liberación de calor latente, lo que debilita los vientos alisios del Este. Esto produce cambios en la circulación oceánica conocidos como ondas Kelvin que profundizan la termoclina y que refuerzan el calentamiento.

El ciclo de retroalimentación negativo comparte con el anterior el efecto del calentamiento sobre la ubicación de la zona de mayor precipitación y liberación de calor latente y el correspondiente debilitamiento de los alisios. Pero este cambio en los vientos además de generar las ondas Kelvin, genera ondas Rossby extra-ecuatoriales que disminuyen la profundidad de la termoclina en el Pacífico central y occidental, que se propagan hacia el Oeste, llegan hasta Indonesia y se reflejan como ondas Kelvin ecuatoriales que se propagan hacia el Este y que eventualmente llegan hasta disminuir el calentamiento en las zonas central y Este. Esta manera de interpretar el fenómeno se conoce como la teoría del oscilador rezagado [Neelin et al., 1998].

Hay estudios sobre la relación entre la hidrología colombiana y los eventos

ENSO [Poveda and Mesa, 1997]. Tanto las observaciones disponibles como el análisis meteorológico y climático soportan la conclusión de que las lluvias y los caudales de los ríos son mayores en los años normales y durante la fase fría de la oscilación ENSO, mientras que disminuyen en la fase cálida (años El Niño). Sin embargo, la relación no es lineal y simple; tal vez una afirmación más correcta sea decir que la variabilidad del clima colombiano es parte integral de un ciclo aperiódico en la interacción océano-atmósfera-continente en la zona ecuatorial, caracterizada por una escala espacial global y una baja frecuencia (2 a 5 años) y cuya principal manifestación es el ENSO. Aunque es bien reconocido el efecto de la oscilación ENSO sobre las lluvias, no se reconoce el hecho de que esta relación es recíproca y que los efectos energéticos de la evapotranspiración, la condensación de vapor y la precipitación tropical son a su vez retroalimentadas y tienen efectos no despreciables sobre el resto del clima.

Pero la integración no termina allí. Los cambios en el momento angular atmosférico global asociado con el fenómeno ENSO, aunque pequeños en relación con el momento angular terrestre, producen cambios observables en la rotación de la Tierra y por tanto en la duración del día. La razón está en que el momento angular total debe conservarse, excepto por el pequeño efecto de la fricción de las fuerzas de mareas. La manera específica por medio de la cual se logran estos ajustes no está totalmente clara. Se sabe que la fricción, los cambios en el nivel del mar y las fuerzas sobre las cadenas de montañas asociadas a las diferencias en la presión atmosférica son parte integrante del balance. Estos elementos han llevado a algunos a pensar que estos ajustes pueden tener incidencias en la sismicidad. Las ciencias de la Tierra sólida también entran en la integración. Además hay cierta evidencia del efecto de las emisiones volcánicas de aerosoles a la estratosfera tropical como uno de los factores en la dinámica de la oscilación ENSO.

2.6.3. Otros patrones de variabilidad

Hay varios otros patrones de variabilidad climática de importancia, a continuación se presenta una breve mención de los principales.

Monzones: en regiones tropicales y subtropicales de Asia, África y Norteamérica se presenta una inversión estacional completa de la circulación como resultado del calentamiento diferencial entre mar y tierra. Sobre tierra, el calentamiento de verano da origen a corrientes ascendentes, lo que indica confluencia de corrientes superficiales provenientes del mar, cargadas de humedad y por tanto hay todos los ingredientes favorables para la precipitación. De hecho, el origen del término se refiere a la aparición periódica (anual) de lluvias en la estación de verano en el subcontinente hindú. No todos los años las lluvias son igual de abundantes, incluso hay años particularmente secos. Inicialmente,

el estudio de la SO correspondía a un intento para mejorar la predicción del Monzón hindú. Hoy sabemos que más bien es un precursor de la oscilación ENSO.

NAO: en el Hemisferio Norte el patrón de circulación predominante en invierno se conoce con el nombre de oscilación del Atlántico Norte, NAO por las siglas en inglés. La NAO es un balancín de masa atmosférica entre la región de alta presión subtropical y la región de baja presión polar. El índice correspondiente cambia de año a año, pero también tiene tendencia a permanecer por varios años en la misma fase. En la fase positiva la presión atmosférica subtropical es anormalmente alta en Azores y la baja presión en Islandia es anormalmente baja. La diferencia intensificada en la presión atmosférica resulta en más fuertes y más frecuentes tormentas de invierno cruzando el Atlántico, con trayectorias más hacia el Norte. Esto produce inviernos menos fríos y con mayor precipitación en forma de lluvia en Europa y el este de Norteamérica, además el vórtice estratosférico es más intenso que lo normal. En la fase negativa los patrones de presión se invierten, las tormentas son menos y más débiles, con trayectoria predominante Oeste–Este, lo que lleva aire húmedo al Mediterráneo y aire frío al norte de Europa. La costa este de Estados Unidos tiene mayores influjos de aire frío y más nieve. Groenlandia tiene sin embargo un invierno menos severo. Varios estudios han relacionado la NAO con clima tropical, en particular Colombia [Poveda and Mesa, 1996].

PDO: la oscilación decenal del Pacífico corresponde a un patrón semejante al ENSO, pero de larga vida. Las dos oscilaciones tienen un patrón espacial semejante, pero temporalmente son diferentes. Hay dos características principales que distinguen ENSO de PDO. La primera es el tiempo típico de duración. ENSO dura entre 6 y 18 meses, mientras PDO dura entre 20 y 30 años. La segunda es que los efectos climáticos de la PDO son más visibles en el Pacífico Norte, el sector americano, mientras que ENSO es más visible en los trópicos [Zhang et al., 1997].

AMO: la oscilación multidecenal del Atlántico Norte es un patrón coherente de variabilidad en la temperatura superficial centrado en el norte del Océano Atlántico. Se ha asociado con la ocurrencia de sequías en el Sahel, variabilidad en la precipitación del Nordeste de Brasil y el clima de Norte América, y con la frecuencia de huracanes en el Atlántico. En el registro de temperatura durante el siglo XX se observan patrones marcados de variabilidad, con tiempo promedio entre picos del orden de 65 años. Se ha señalado una posible relación de esta oscilación con cambios en la circulación termohalina, teniendo en cuenta la gran cantidad de calor que ésta transporta hacia el Norte. Los resultados de modelos acoplados parecen confirmar que esta oscilación es una característica del sistema climático. Asociado al transporte meridional de calor por el océano se presentan gradientes más fuertes de temperatura a través del

Ecuador durante las fases cálidas de AMO. Esto causa un desplazamiento hacia el Norte de la zona intertropical de convergencia lo que conduce a mayores lluvias y el desarrollo de anomalías de salinidad baja en el Atlántico Tropical Norte. Estas anomalías se propagan lentamente hacia el Norte hasta el Océano Atlántico subpolar en unas 5 décadas. Allí esta anomalía de salinidad debilita la circulación termohalina [Knight et al., 2005].

2.6.4. Efecto de erupciones volcánicas

Plutarco señaló que la erupción del Etna en el año 44 a.c. opacó el sol, y atribuyó al enfriamiento resultante, la falla en las cosechas y la hambruna en Roma y Egipto. Benjamin Franklin sugirió que la erupción del Lakagigar en Islandia en 1783 fue la responsable de que en Europa, en ese año, el verano y el subsecuente invierno fueran anormalmente fríos. Algunos le atribuyen un papel a la megaerupción del volcán Toba, 71000 años a.c. en la glaciación subsiguiente. Revisiones detalladas sobre el efecto climático de las erupciones volcánicas se encuentran en Lamb [1970]; Robock [2000]; Kondratyev and Galindo [1977].

El material de las erupciones volcánicas está compuesto principalmente por cenizas y gases de dióxido de azufre, ácido clorhídrico, vapor de agua y H_2S . El efecto de la ceniza en el clima local puede ser importante, pero no en el clima global; porque la ceniza dura muy poco en la atmósfera y no se extiende a grandes áreas.

Si la erupción de gases penetra solamente la troposfera su efecto climático también es menor, pues se lavaran en cuestión de meses. Si la fuerza de la erupción es suficiente para penetrar a la estratosfera la situación es completamente diferente. Aunque la ceniza se precipita en los primeros meses, la estabilidad vertical de la atmósfera en esta capa trae un efecto mucho más duradero de los gases, que se dispersan horizontalmente debido a cortante. El dióxido de azufre reacciona con el agua y produce ácido sulfúrico, que a la temperatura prevaleciente ($-50^{\circ}C$ a $-80^{\circ}C$) se condensa para formar aerosol de tamaños inferiores al micrómetro ($0,5 \mu m$). Estas partículas son muy eficientes para dispersar la luz solar que tiene longitudes de onda de ese orden. En consecuencia, la parte baja de la atmósfera y la superficie terrestre experimentan una pérdida neta de radiación solar por dispersión hacia atrás (lo que aumenta el albedo) y además una redistribución de la absorción de la radiación solar. Parte de la radiación solar se dispersa hacia delante, produciendo un incremento en la radiación difusa hacia abajo, lo que compensa parcialmente la disminución en el rayo solar directo.

Estos efectos se aprecian en cambios de color en el cielo. Por ejemplo el azul celeste normal se vuelve lechoso por el aumento de la radiación difusa. La reflexión del sol poniente en las capas inferiores del aerosol estratosférico producen

los característicos atardeceres rojizos (el famoso cuadro “El Grito” de Munch, 1892, muestra un atardecer en Oslo después de la erupción del volcán Awu). La instrumentación moderna ha permitido determinar con mayor detalle el efecto radiativo de los aerosoles a diferentes alturas y longitudes de onda. Para el caso del Pinatubo las mediciones muestran un calentamiento en la parte superior de la nube de aerosol, por absorción en el infrarrojo cercano. En la estratosfera baja, la atmósfera se calienta por absorción de radiación de onda larga de la troposfera y la superficie. También se producen cambios en la microfísica de las nubes, la química de la lluvia, las tormentas eléctricas y en la convección profunda como resultado de la abundancia de núcleos de condensación. Estos aerosoles tienen a su vez un impacto severo sobre la química de la estratosfera, en particular sobre el ozono. De hecho, se ha señalado [Solomon, 1999] que el agujero en la capa de ozono está fuertemente relacionado con la actividad volcánica natural, además de la actividad antrópica.

Con el tiempo los aerosoles se dispersan hacia los polos, con mayor transporte en el invierno en cada hemisferio. Este proceso puede tomar hasta 2 años. Es posible que haya cruce del Ecuador con el cambio de las estaciones, todo dependiendo de la latitud de la erupción. El efecto climático de una erupción también es por lo tanto función de su latitud.

En términos generales se ha argumentado que las erupciones volcánicas producen reducción de la amplitud del ciclo diurno de temperatura, enfriamiento en verano, reducción de precipitación en los trópicos, calentamiento estratosférico y calentamiento en invierno, desarrollo del fenómeno ENSO y la pequeña edad de hielo de la edad media.

La evidencia más clara es la disminución de temperatura. Lamb [1970] discute la evidencia desde 1500 hasta 1968. En general, las mayores erupciones han significado un enfriamiento global de la baja atmósfera. En las gráficas de temperatura contra tiempo se puede observar este efecto, en particular para los volcanes Kraratoa, Agung y Pinatubo. Las relaciones con el monzón hindú o el fenómeno ENSO son discutibles y en general no hay consenso al respecto. Robock [2000] presenta evidencia en el sentido relación entre erupciones volcánicas y el patrón de la oscilación del Atlántico Norte (NAO).

2.7. Ejercicios

2.7.1. Eratóstenes en el año 240 a.c. estimó el diámetro de la Tierra al notar que en un día particular, mientras en Siena el Sol iluminaba el fondo de un pozo, en Alejandría los rayos del Sol hacían un cierto ángulo con un poste vertical. Midió este ángulo y la distancia entre las dos ciudades y obtuvo mediante un razonamiento geométrico simple una excelente aproximación para el tamaño de

la Tierra. Reproduzca el argumento de Eratóstenes. Proponga otras maneras de estimar el diámetro de la Tierra

2.7.2. El movimiento de dos cuerpos bajo fuerzas centrales es un problema elemental de física. Tome la ocasión para repasar o aprender. Las leyes de Kepler se demuestran fácilmente con este modelo: (i) los planetas se mueven en órbitas elípticas con el Sol (realmente el baricentro o centro de masa de las dos masas que en términos prácticos es la posición del Sol) en uno de los focos, (ii) barren áreas iguales en tiempos iguales y (iii) los cuadrados de los períodos varían como los cubos de las distancias medias. Obtenga la ecuación de la órbita $r = a(1 - e^2)/(1 + e \cos \theta)$ y la ecuación de Kepler, $\omega t = \psi - e \sin \psi$, en la cual a es el semieje mayor, e es la excentricidad, θ es la anomalía verdadera, ψ es la anomalía excéntrica, definida a partir de la anomalía verdadera, mediante $\tan(\theta/2) = \sqrt{(1+e)/(1-e)} \tan(\psi/2)$ y ω es la frecuencia de revolución. El sistema de coordenadas se toma normalmente con centro en el baricentro, el eje x hacia el perihelio, el eje y perpendicular al eje x , en el plano de la órbita y el eje z perpendicular al plano de la órbita. La anomalía verdadera es entonces el ángulo entre el perihelio y la posición del planeta, con vértice en el Sol. El producto ωt se conoce como anomalía media y representa la anomalía verdadera que resultaría si la velocidad fuera constante en una órbita circular. Para el 1 de enero de 2000 la excentricidad es $e = 0,016708$. La frecuencia es $\omega = 2\pi/\tau$ y la duración del año tropical es $\tau = 365,2422$ días.

Ayuda: el problema se expresa mejor usando una masa reducida, $m = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ que se mueve al rededor del centro de fuerzas en el origen. La simetría esférica implica conservación de momento angular, lo que demuestra que el movimiento es plano. La velocidad y aceleración se pueden expresar como $\mathbf{v} = \dot{r}\mathbf{u}_r + r\dot{\theta}\mathbf{u}_\theta$ y $\mathbf{a} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\mathbf{u}_r + (2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta})\mathbf{u}_\theta$, y el momento angular como $\mathbf{l} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v} = mr^2\dot{\theta}\mathbf{u}_z = l\mathbf{u}_z$, con l una constante. De aquí se obtienen los operadores $\frac{d}{dt} = \frac{l}{mr^2} \frac{d}{d\theta}$ y $\frac{d^2}{dt^2} = \frac{l}{mr^2} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{l}{mr^2} \frac{d}{d\theta} \right)$. La fuerza gravitatoria radial se puede expresar como $-k\mathbf{u}_r/r^2$, con $k = Gm_1 m_2$. La segunda ley de Newton en la dirección radial es $m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = -k/r^2$. Usando los operadores diferenciales anteriores y cambiando de variable $y = 1/r - mk/l^2$, se obtiene $y'' + y = 0$, que integra a la ecuación de la órbita con a el semieje mayor y $e = \sqrt{1 - l^2/(mka)}$. Si la energía total es E , se obtiene otra expresión para $a = -k/E$ o para $e = \sqrt{1 + 2El^2/(mk^2)}$. La ecuación de Kepler se obtiene de integrar la ecuación de conservación del momento angular con el cambio de variable entre la anomalía verdadera θ y la anomalía excéntrica ψ . La frecuencia angular es $\omega = \sqrt{k/(ma^3)}$.

2.7.3. Mediante una figura esquemática ilustre que el flujo de radiación por unidad de área que incide en una superficie inclinada respecto a la dirección de los rayos se afecta por un factor igual al coseno del ángulo entre los rayos y la perpendicular a la superficie. Para un punto cualquiera de la superficie

terrestre, con latitud ϕ , se define el ángulo cenital solar, α_s , como el ángulo entre la normal local a la superficie y la recta que une el centro del Sol y el punto en cuestión. Al punto sobre la superficie terrestre directamente bajo el Sol a medio día lo denominamos punto subsolar. Su latitud corresponde a la declinación solar, δ , que claramente depende de la época del año y que varía entre $+\Phi$ en el solsticio de verano del Hemisferio Norte (aproximadamente junio 21) y $-\Phi$ en el solsticio de invierno (aproximadamente diciembre 21). $\Phi = 23,439\,291\,1^\circ$ corresponde a la oblicuidad del eje de rotación terrestre, es decir el ángulo entre el eje de rotación y una perpendicular al plano de la órbita. El valor indicado es el correspondiente al 1 de enero del año 2000, a las 12 tiempo universal (tiempo juliano 2 451 545,0). El ángulo horario local, h , se define como el ángulo entre el plano del meridiano local y el plano del meridiano del punto subsolar. Represente sobre una esfera unitaria los puntos y ángulos definidos y mediante ley de cosenos, o cálculo vectorial, muestre que $\cos \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h$

2.7.4. Sea Λ el ángulo entre el equinoccio de verano y el perihelio con vértice en el Sol, que se conoce como la longitud del perihelio. Para el 1 de enero del año 2000, $\Lambda = 257,062652^\circ$. Demuestre la siguiente expresión para la declinación solar en función de la anomalía verdadera, la longitud del perihelio y la oblicuidad: $\sin \delta = \sin(\theta + \Lambda) \sin \Phi$

2.7.5. Muestre que la insolación en el tope de la atmósfera I se puede calcular mediante

$$I = S_0 \left(\frac{1 + e \cos \theta}{1 - e^2} \right)^2 [\sin \phi \sin(\theta + \Lambda) \sin \Phi + \cos \phi \cos \delta \cos(\lambda - \eta)], I > 0,$$

donde λ es la longitud y η es el ángulo horario y S_0 es la constante solar correspondiente a la distancia media entre la Tierra y el Sol.

2.7.6. Muestre que el ángulo horario local h_0 al amanecer y al atardecer en un punto de latitud ϕ en la época del año correspondiente a la declinación solar δ se obtiene de $\cos h_0 = -\tan \phi \tan \delta$. ¿Qué sucede cerca a los polos? Muestre que la insolación promedio diaria en el tope de la atmósfera es $S_0(\bar{d}/r)^2 [h_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin h_0]/\pi$. Donde \bar{d} es la distancia media de la Tierra al Sol.

2.7.7. Con los resultados de los ejercicios anteriores haga los cálculos necesarios para producir la parte izquierda de la Figura 2.9.

2.7.8. Para el diseño arquitectónico de edificaciones es necesario conocer la variación del asoleamiento en función de la hora del día y la época del año. En las zonas de latitudes altas y medias el criterio es dejar entrar el Sol en invierno

e impedir su entrada en verano. En general en los trópicos se busca evitar la entrada del Sol, sobre todo el poniente. El diseño eco-climático se apoya en una cuidadosa selección de la orientación de las ventanas, la colocación de aleros y otras barreras y el diseño de los materiales. Para tres latitudes típicas represente la trayectoria del Sol en un día típico de diciembre, marzo y junio. Proponga la orientación de las ventanas.

2.7.9. La superficie terrestre no es plana y la cantidad de radiación que recibe un determinado sitio depende de la orientación de la superficie. Para la vegetación esta circunstancia puede tener influencia significativa, especialmente en latitudes altas o en zonas montañosas. El aspecto es la orientación respecto al Norte geográfico de una superficie, expresada como un rumbo o un acimut. Así por ejemplo, en las montañas rocosas de Canada, una ladera con aspecto Norte prácticamente no recibe Sol en invierno. Esto se refleja en el paisaje tanto en la vegetación como en la acumulación de nieve e incluso en la cobertura de suelo y en las tasas de evaporación. Discuta la importancia del aspecto en el clima tropical. Desarrolle una aplicación.

2.7.10. El modelo anterior para la orbita terrestre asume que la influencia de los otros planetas y de la Luna es despreciable en comparación con la atracción del Sol, y que la forma del planeta es esférica para justificar su tratamiento como un punto. Estas hipótesis son muy buenas para la mayoría de los efectos, pero no para perturbaciones menores de las órbitas. En particular la atracción de la Luna y el Sol sobre la barriga terrestre que resulta de su forma de geode produce la precesión del eje de rotación, o precesión de los equinoccios como la bautizó Hiparco de Nicea, el astrónomo griego que la midió con excelente precisión en el año 150 a.c. como $50,2''$ por año, lo que corresponde a un período de 26000 años. Desde la Tierra esto se observa como un movimiento retrógrado de los puntos equinociales en virtud del cual se anticipan un poco cada año las épocas de los equinoccios o principios de las estaciones. Es decir una oscilación en la longitud del perihelio Λ . Además, por efecto de los otros planetas, principalmente Jupiter y Venus, hay variación de la orientación en el espacio del plano de la eclíptica. Como resultado de ambos, la oblicuidad del eje de rotación Φ tiene una oscilación con período aproximado 41000 años. Como uno de los resultado de tal oscilación las zonas polares se están haciendo cada vez mayores y las tropicales menores. Actualmente estamos en medio de un ciclo, con un valor cercano al promedio y disminuyendo. En términos de distancias en la Tierra, el Trópico de Cancer se ha desplazado hacia el Sur algo más de 1 km en el último siglo. Esto se refleja por ejemplo en un monumento con su ubicación precisa que los Japoneses construyeron para celebrar la terminación de un ferrocarril en Taiwan en 1908. El Trópico de Cancer hoy está más de 1 km al Sur del monumento original y se desplazará todavía otros 93 km más

hacia el Sur antes de retornar en su movimiento hacia el Norte dentro de 9300 años [Chao, 1996]. Taiwan ha construido posteriormente varios otros monumentos conmemorativos. La excentricidad de la órbita tampoco es constante. Consulte los fundamentos físicos de estos cambios en los parámetros orbitales terrestres (e, Λ, Φ) [Held, 1982].

2.7.11. En el Ejercicio 2.7.5 se calculó la insolación en cualquier punto de la Tierra para cualquier época. Dicho cálculo depende de la latitud, la longitud, la excentricidad (e), la oblicuidad (Φ), la longitud del perihelio (Λ), la posición de la Tierra según la época del año (θ) y al ángulo horario (η). Estas últimas cinco variables dependen cuasiperiódicamente del tiempo con frecuencias correspondientes a períodos de 400 y 100 mil años para e , 41 mil años para Φ , 21 mil años para Λ , 1 año para θ y 1 día para η . El sistema climático es un sistema no lineal que responde a dicho forzamiento externo. Consulte los conceptos de frecuencia modulada, amplitud modulada, sincronización, enfasamiento, rectificación y transferencia de energía de una frecuencia a otra en la teoría de señales. Discuta la aplicación al sistema climático.

2.7.12. En la ecuación del Ejercicio 2.7.5 se puede notar la presencia de dos períodos muy cercanos entre sí correspondientes al año tropical (tiempo entre pasos sucesivos de la Tierra por el equinoccio, asociado a $\theta + \Lambda$, igual a 365,2422 días) y el año anomalístico (tiempo entre pasos sucesivos de la Tierra por el perihelio, asociado a θ , igual aproximadamente a 365,2422 días más $1/21000$ años, es decir 365,25964 días). En los registros climáticos de longitudes relativamente cortas (100 años) es posible apreciar el efecto de esta doble frecuencia como un cambio en la fase del ciclo anual mediante demodulación compleja [Thomson, 1995; Mesa et al., 1997]. Consulte la historia de los calendarios, analice el desfase que resulta de los diferentes modelos. Consulte la demodulación compleja.

2.7.13. Las distancias medias del Sol a Venus y a Marte son $1,08 \times 10^{11}$ m y $2,28 \times 10^{11}$ m respectivamente. Los albedos se estiman en 0,71 y 0,16. Las temperaturas superficiales observadas son aproximadamente 720 K y 220 K. Se explica que Venus sea tan caliente sólo por su cercanía al Sol? El albedo de Venus explica su brillo excepcional, pero de allí se deduce que absorbe menos energía que Marte, explique las temperaturas superficiales observadas, compare con la Tierra.

2.7.14. Discuta la siguiente frase de Thomas Schelling, premio Nobel de Economía 2005: “El efecto invernadero es un proceso complicado que está calentando progresivamente la Tierra. La Tierra es bañada por la luz solar, parte de ella es absorbida y parte reflejada al espacio. Si la absorción no se iguala con devolución de radiación al espacio, la Tierra se calentará hasta que la

intensidad de la radiación se iguale con la luz solar incidente. Algunos gases absorben radiación infrarroja emitida y por lo tanto calientan la atmósfera. El dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los fluorocarbonos son este tipo de gases. La concentración de estos gases está aumentando, con el resultado de que la Tierra está absorbiendo más radiación solar y se está calentando” [Schilling, 1993].

2.7.15. Discuta las siguientes afirmaciones sobre la variación anual de las principales variables climáticas en el Pacífico. ¿Concuerda con la evidencia presentada en las gráficas? ¿Los argumentos físicos son necesarios y/o suficientes? “El ciclo anual de temperatura superficial del mar en el este del Pacífico ecuatorial presenta un máximo en febrero y un mínimo en octubre, con una amplitud de entre 3 y 4 °C. Durante los eventos ENSO, fase cálida, la amplitud se incrementa hasta 5 o 7 °C, por incremento del máximo, siguiendo un debilitamiento de los alisios. El ciclo anual de temperatura en la zona ecuatorial no obedece directamente al ciclo semianual de radiación solar. Esto indica que el clima en esta zona está dominado por regiones en las que el ciclo anual es dominante. Un factor determinante es la transferencia de masas de aire desde los continentes hacia los anticiclones oceánicos en ambos hemisferios. Los vientos alisios son máximos en julio y mínimos en diciembre. Es claro que las temperaturas del mar están inversamente ligadas a la magnitud de los vientos con un rezago de dos a tres meses. La razón para esto está en los procesos de evaporación, mezcla con aguas más profundas y más frías, y surgencia de aguas profundas; todos estos fenómenos que son función directa de la velocidad del viento, tienen un claro efecto de enfriamiento de las aguas superficiales. Los vientos a su vez están controlados por gradientes de presión atmosférica a nivel del mar, que es función de la cantidad de masa de aire en la columna atmosférica. Esta transferencia de masa de aire entre los continentes y los océanos está controlada por el calentamiento diferencial de mar y tierra, la distribución geográfica de los continentes y el ciclo anual de radiación, en particular, el Hemisferio Norte tiene mucha más masa emergida que el Sur. Todos los anticiclones oceánicos incrementan la presión en julio, en aproximadamente 6 hPa, incluso en el Hemisferio Norte, cuando es más caliente allí. Esto ocurre básicamente por el calentamiento continental y la circulación monzónica. La transferencia de masa desde el sur del continente euro-asiático hacia los océanos es particularmente significativa. Los anticiclones oceánicos pueden acomodar más masa al desplazarse hacia los polos sobre aguas más frías. Realmente todo el este del Pacífico subtropical tiene presión atmosférica mayor durante este período. Los vientos responden a estos cambios consistentemente”.

CAPÍTULO 3

Cambio Climático

Desde 1998 por iniciativa del Programa Ambiental de las Naciones Unidas y de la Organización Meteorológica Mundial se conformó un panel internacional de científicos (conocido como IPCC por sus siglas en Inglés) con el objeto de evaluar todo lo relacionado con el cambio climático.

En la primera sección de este capítulo se presenta un apretado resumen del último reporte (el tercero después de dos previos en 1990 y 1996, IPCC [2001a, b]) que contiene las conclusiones sobre los principales temas y proyecciones de las posibles consecuencias. Este reporte tiene el mérito de ser una descripción actual de lo que se sabe y no se sabe sobre cambio climático, proceder del consenso de un cuerpo numeroso de los más calificados científicos de diversos países en varios campos del saber, de haber sido sometido a un exigente escrutinio científico mediante la modalidad de jurados y de apoyarse en publicaciones científicas que se presentan de manera útil para los responsables de decisiones. En la segunda sección se procede a presentar evidencias de cambio climático a partir de observaciones. En la tercera sección se resume la discusión teórica, la incertidumbre y los problemas abiertos sobre cambio climático, en particular se trata de aportar razones acerca del fracaso del Protocolo de Kyoto [United-Nations, 1997]. En la última sección se profundiza sobre el ciclo del carbono, una de las componentes principales del problema del cambio climático.

No todos los temas importantes sobre cambio climático son analizados en este trabajo. Por ejemplo sobre la influencia del metano, sobre el agujero en la capa de ozono y sobre el papel de los aerosoles atmosféricos se podría profundizar mucho más.

3.1. Resumen del reporte del IPCC

Las preguntas fundamentales son: ¿Hay interferencia humana perjudicial sobre el sistema climático? ¿Cuáles son las causas y las consecuencias? ¿Hay decisiones que tomar?

Lo primero es reconocer que aunque las ciencias naturales, la ingeniería y las ciencias sociales pueden aportar elementos, las decisiones obedecerán a juicios de valor y a procesos socio políticos. La calificación de interferencia antrópica perjudicial varía de región a región según los impactos, la magnitud y velocidad de los cambios, y la capacidad de adaptación y mitigación de las sociedades. Para ello es necesario tener en cuenta la complejidad de los procesos. El cambio climático hace parte del ámbito más general del desarrollo sostenible y las decisiones que se tomen deben hacer el balance de costo–beneficio de los impactos, de las opciones de mitigación y adaptación y los riesgos de medidas insuficientes o excesivas. Además necesariamente las decisiones se deben tomar aunque la información y el conocimiento disponible sean parciales o incompletos. No hacer nada es una de las posibles decisiones, como tal requiere evaluación, y no debe simplemente resultar por falta de consideración o por ignorancia.

Hay diversas evidencias sobre las causas y las consecuencias de los cambios en el clima terrestre desde el inicio de la era industrial. El sistema climático del planeta ha cambiado de manera importante a escala local, regional y global desde la época preindustrial, y algunos de estos cambios se pueden atribuir a actividades humanas. La agricultura, la deforestación, la ganadería, la industria y el transporte han producido aumento considerable en las concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera. El efecto neto de estos gases es de calentamiento mediante el denominado efecto invernadero (Sección 2.2.2). Persiste incertidumbre sobre la magnitud del cambio y sobre todas las posibles implicaciones.

Del análisis de las observaciones disponibles sobre el clima durante el siglo XX se puede concluir con muy alta confiabilidad que la temperatura media en la superficie se incrementó en $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$ y que el incremento fue mayor en los continentes que en los mares. Para el Hemisferio Norte hay confiabilidad en afirmar que el anterior siglo y la última década han sido las más calientes del último milenio. Hay también buena confiabilidad en que la frecuencia de días cálidos ha aumentado. Hay altísima confiabilidad en que la frecuencia de días fríos ha disminuido. Los cambios de temperatura no se han producido de manera homogénea en todo el mundo, sino que han variado según las diferentes regiones y diferentes partes de la baja atmósfera.

Sobre la precipitación se puede afirmar con alta confiabilidad que ha aumentado sobre tierra en el Hemisferio Norte, aunque en regiones del Mediterráneo y de África occidental ha disminuido. Igualmente con confiabilidad se puede afir-

mar que han incrementado los eventos extremos de precipitación en latitudes medias y altas del Hemisferio Norte. Ha aumentado la intensidad máxima de los ciclones tropicales y la intensidad media y máxima de las precipitaciones (confiable) en algunas zonas. Las sequías en verano en algunas áreas continentales han aumentado, en particular en zonas de Asia y África parece haber aumentado la frecuencia e intensidad.

El nivel medio del mar ha aumentado a una tasa anual de 1 a 2 mm. La duración del hielo sobre lagos y ríos en el invierno del Hemisferio Norte ha disminuido dos semanas en el último siglo. Desde 1950, el espesor del hielo del Ártico, en el final del verano y principios del otoño, ha disminuido en 40 % y su área en primavera y verano ha decrecido entre el 10 y el 15 %. Se predice incluso que en unos cuantos años el Ártico en verano estará libre de hielo, lo cual tiene importantes consecuencias económicas y por supuesto climáticas. Los glaciares no polares han retrocedido significativamente, en particular los glaciares colombianos están desapareciendo [Hoyos-Patiño, 1998]. Desde que hay observaciones de satélite (1960's) el área global cubierta por nieve ha disminuido el 10 %. Las regiones de tundra se han degradado, disminuido, y el suelo se ha derretido en partes de las regiones polares, subpolares y montañosas. Los eventos ENSO se han vuelto más frecuentes durante los últimos 20 a 30 años en comparación con los anteriores 100 años (puede explicarse también como parte de una oscilación decenal natural).

La temporada de crecimiento de las cosechas se ha incrementado entre 1 y 4 días en los últimos 40 años, especialmente en las altas latitudes. Hay migración de especies animales y vegetales hacia zonas más altas y de mayor latitud, por ejemplo insectos, pájaros y peces. En Colombia se ha verificado que los mosquitos vectores de enfermedades tropicales han ascendido en pisos térmicos, al igual que cultivos de zonas templadas como el café. En regiones con estaciones la época de inicio de la floración de las plantas se ha adelantado, igualmente la llegada de aves migratorias, épocas de apareamiento y emergencia de insectos. La frecuencia de los episodios de blanqueo de corales ha aumentado. La pérdidas por eventos asociados con el clima se ha multiplicado por 10 en los últimos 40 años aún después del ajuste por inflación. En parte esta tendencia se explica por razones socioeconómicas ante la mayor exposición al riesgo, mayor población en áreas vulnerables, mejor información y por el crecimiento económico (factor de 7 en los últimos 50 años), pero queda una porción atribuible al clima. Todos estos cambios están asociados y son consistentes con el calentamiento global derivado del efecto invernadero.

La concentración de los principales gases de efecto invernadero CO_2 , CH_4 , N_2O y O_3 troposférico ha superado en la última década los máximos niveles registrados. El crecimiento se debe fundamentalmente a la quema de combustibles fósiles y a cambios en el uso de la tierra. Es claro que el forzamiento

radiativo de estos gases es positivo (calentamiento), aunque hay todavía alguna incertidumbre sobre su magnitud. Por otro lado, también ha aumentado la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera, cuyo efecto directo es negativo (enfriamiento) pero de menor magnitud. Su efecto indirecto a través de las nubes puede ser mayor, pero todavía hay incertidumbre para su cuantificación. En resumen, hay cada vez mayor evidencia del calentamiento global y de su causa. De no tomarse ninguna medida para limitar el crecimiento de la emisión de CO_2 mediante reducción de la quema de combustibles fósiles, la concentración atmosférica seguirá aumentando. Desde 1750 la concentración pasó de 280 ± 10 ppm a 370 ppm en 1999, y continúa creciendo. Este valor es el mayor que hemos tenido en los últimos 420 000 años. Además, las tasas de crecimiento no tienen precedentes en los últimos 20 000 años. Incluso para estabilizar la concentración en valores de 450, 650 o 1 000 ppm es necesario que las emisiones antropogénicas desciendan por debajo de los niveles de 1990 dentro de una década, un siglo o dos siglos según el límite. Hay incertidumbre sobre los escenarios de desarrollo tecnológico y económico que puedan conducir a tales cambios en el uso de la energía. En el Capítulo 4 se examina con mayor profundidad la situación energética. La concentración atmosférica de CH_4 aumentó el 150 % en los últimos 250 años al pasar de 0,7 ppm a 1,75 ppm. La concentración atmosférica de N_2O aumentó el 17 % al pasar de 0,27 ppm a 0,316 ppm. La concentración estratosférica de O_3 disminuyó significativamente en los últimos años y en la troposfera aumentó.

Se estima que el incremento en la concentración atmosférica de CO_2 se debe en un 75 % a la quema de combustibles fósiles y el resto a cambios en el uso de la tierra [IPCC, 2001a]. El incremento en la emisión por quema de combustibles es mayor que el incremento en la concentración atmosférica. El mar y los ecosistemas terrestres capturan la diferencia. En la última década del siglo pasado se estima un incremento de $6,3 \pm 0,4$ Pg de C por año en la emisión como resultado de la quema de combustibles ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$). En la atmósfera el incremento en la concentración de CO_2 representa un aumento de $3,2 \pm 0,1$ Pg de C por año. La diferencia corresponde a captura de carbono en el océano y los continentes. Mediante técnicas isotópicas es posible separar entre la captura de CO_2 por océano y por los continentes. En la década de los 90's se estima en $1,7 \pm 0,5$ Pg de C por año la captura por el océano y en $1,4 \pm 0,7$ Pg por los continentes. La Tabla 3.1 resume estas cifras.

En algunos años individuales las cifras pueden ser diferentes debido a variabilidad climática y ecológica. Por ejemplo, en los períodos correspondientes a la fase caliente del fenómeno El Niño- Oscilación del Sur (ENSO por la siglas en inglés) se ha observado mayor incremento, aunque no siempre, del CO_2 atmosférico. Probablemente por cambios en los ecosistemas tropicales, sequías e incendios forestales, más que por aumento de la temperatura del mar. De

Tabla 3.1: Incrementos de carbono en la atmósfera, las emisiones por quema de combustibles fósiles, y los cambios en los flujos con la atmósfera. Datos en Pg por año, estimados como promedio para la década indicada.

	Década 1980	Década 1990
Incremento en la Atmósfera	$3,3 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$
Incremento por Emisiones	$5,4 \pm 0,3$	$6,3 \pm 0,4$
Flujo Océano-Atmósfera	$-1,9 \pm 0,6$	$-1,7 \pm 0,5$
Flujo Continente-Atmósfera	$-0,2 \pm 0,7$	$-1,4 \pm 0,7$
repartidos en:		
Por Cambio en uso	$1,6 \pm 1,0$	s. d.
Residuo	$-1,8 \pm 2,1$	s. d.

hecho, las mediciones indican que en el este del Océano Pacífico tropical, donde se produce el mayor calentamiento en tales épocas, disminuye la fuente natural de CO₂.

Por deforestación tropical y cambios en el uso del suelo se estima [IPCC, 2001a] que en la década de los 80's se inyectaron a la atmósfera del orden de $1,7 \pm 0,8$ Pg de C por año. Otros autores presentan diferentes estimaciones. Este asunto tiene implicaciones políticas en lo referente a las medidas de control en los protocolos internacionales, tal como el Protocolo de Kyoto [United Nations, 1997]. En la Sección 6.4 se presenta mayor discusión sobre este asunto.

El panel [IPCC, 2001a] consideró posibles escenarios de emisiones de gases invernadero de acuerdo a diferentes hipótesis socioeconómicas (demográficas, sociales, económicas y tecnológicas). La concentración proyectada de CO₂ en el año 2100 oscila según el escenario entre 540 y 970 ppm, comparada con cerca de 280 ppm en la época preindustrial, y cerca de 368 ppm en el año 2000. Los escenarios también dan como resultado niveles diferentes de los otros gases de efecto invernadero y aerosoles en el futuro. Hay mayor incertidumbre, sobre todo respecto a los procesos actuales de eliminación (los sumideros de carbono) y la magnitud del impacto de la respuesta climática en la biosfera terrestre. Esto produce una variación de -10 a ± 30 por ciento en la concentración estimada en cada escenario para el año 2100. Por lo tanto, la gama total sería de 490 a 1 260 ppm, es decir de un 75 a un 350 por ciento por encima de la concentración del año 1750 (época preindustrial). Las proyecciones de las concentraciones de los gases de efecto invernadero diferentes al CO₂ varían considerablemente en los escenarios hasta el año 2100. Con base en los escenarios de emisiones se realizó una gama de simulaciones climáticas que dan como resultado un aumento de la temperatura media de la superficie del planeta de 1,4 a 5,8 °C en el período 1990–2100. Este incremento es entre 2 y 10 veces superior al valor

central del calentamiento observado durante el siglo XX, y es muy probable que la velocidad proyectada del calentamiento no tenga precedentes durante, al menos, los últimos 10 000 años, basándonos en datos de paleoclima. Las simulaciones climáticas entregan proyecciones de las demás variables climáticas en las diferentes regiones, según los escenarios. Por ejemplo, la precipitación media global aumenta del orden del 3 %, con variación entre -1 y 7 % según los escenarios y los modelos.

Entre los posibles impactos socioeconómicos del calentamiento global se pueden enumerar los siguientes: aumento de la incidencia de muertes y enfermedades graves en ancianos y la población urbana pobre por olas de calor; aumento de problemas producidos por el calor en el ganado y la fauna silvestre; cambio de destinos turísticos; aumento de riesgo de daños en varios cultivos; aumento de la demanda de energía para aparatos de refrigeración y la consecuente disminución de la confiabilidad del suministro eléctrico en épocas de calor; aumento del riesgo a la vida humana, debido a epidemias infecciosas.

La disminución de los días fríos y de las temperaturas mínimas trae los siguientes impactos: disminución de la morbilidad y mortalidad producida por problemas relacionados con el frío; disminución del riesgo de daños en algunos cultivos, y aumento del riesgo en otros; ampliación del área de distribución y actividad de algunas plagas y enfermedades transmitidas por vectores; menor demanda de energía para calentamiento.

El aumento de la intensidad de lluvias ocasiona: aumento de los daños ocasionados por inundaciones, deslizamiento de tierras, avalanchas y lodo; aumento del riesgo a la vida humana por estas amenazas; aumento de la erosión del suelo; aumento de la escorrentía tras inundaciones, que podría aumentar la recarga de algunos acuíferos; aumento de presión sobre los sistemas de seguros contra inundaciones y los sistemas de atención y prevención de desastres.

El aumento en la severidad o frecuencia de las sequías tiene impacto en: disminución del rendimiento de las cosechas; disminución de la calidad y cantidad de los recursos hídricos; aumento del riesgo de incendios forestales; disminución de potencial de energía hidroeléctrica en zonas propensas a las sequías. El aumento del nivel del mar trae inundaciones en zonas costeras y graves impactos ecológicos en frágiles ecosistemas. El cambio climático puede agravar la escasez de agua en muchas zonas del mundo en que ese recurso ya es insuficiente.

El cambio climático proyectado puede tener efectos beneficiosos y adversos en los sistemas ambientales y socioeconómicos, pero a mayores cambios y mayor velocidad, mayor predominio de los efectos adversos. Se prevé que los impactos adversos del cambio climático afecten de forma desproporcionada a los países en desarrollo y las personas más pobres. En algunas zonas, la productividad de las plantas puede aumentar si el incremento de las temperaturas es pequeño. Pero el impacto será negativo en todos los lugares si el calentamiento es mayor.

3.2. Evidencias

3.2.1. Problemas de detección

Cualquier cambio en el clima de origen antrópico está mezclado con un fondo de variabilidad natural que ocurre a toda suerte de escalas temporales y espaciales. Por ejemplo, cambios en la actividad solar o en la emisión de gases y aerosoles como resultado de erupciones volcánicas han producido variabilidad climática. Además sin que se requiera este tipo de forzamiento externo, el sistema climático, como resultado de interacciones no lineales entre sus componentes, experimenta variabilidad significativa, como la que se explicó en relación con ENSO a escala interanual.

Para distinguir los cambios antropogénicos de la variabilidad natural, es necesario identificar la “señal” presente en medio del “ruido” de la variabilidad natural. Los efectos antrópicos van más allá del llamado cambio global e incluyen perturbaciones locales y regionales. Por ejemplo es claro que el proceso de urbanización trae calentamiento local por disminución del albedo debido al aumento de superficies cubiertas de concreto y otros materiales más absorbentes de calor que la vegetación. Una estación ubicada en una ciudad que ha experimentado un crecimiento significativo durante el período de registro necesariamente presenta evidencia de tales cambios. Esta “isla de calor” trae consecuencias en los patrones de circulación, en la precipitación y en las demás variables hidrológicas. De manera semejante, los cambios en el uso del suelo, como la deforestación o la formación de lagos artificiales u otros cambios, traen perturbaciones que afectan de una u otra manera el clima local. Es posible que estos cambios sean de mayor intensidad que los correspondientes al cambio global y de signo opuesto o igual.

Si hay dificultad para los científicos del clima para identificar el cambio climático, la sociedad tiene todavía mayor incapacidad para apreciarlo, convencerse y tomar las medidas necesarias. Los cambios son lentos, graduales, mezclados con variabilidad natural; las personas han experimentado cambios mayores en el clima por movilidad, y las actividades humanas parecen depender cada vez menos del clima. No es por casualidad que las discusiones políticas finalmente recaigan sobre la evidencia. Sin embargo, las conclusiones son claras como se ilustra a continuación. Pero no se puede negar que hay lugar a dudas y que sobre aspectos de importancia subsiste mucha incertidumbre.

En esta sección se presenta la principal evidencia empírica sobre el cambio climático global tomada de Folland et al. [2001]. En Mesa et al. [1997] se hizo un examen de la evidencia para Colombia.

Algunas variables, como la temperatura, se están midiendo de manera sistemática desde el siglo XIX, sobre todo en algunos lugares. Para otras varia-

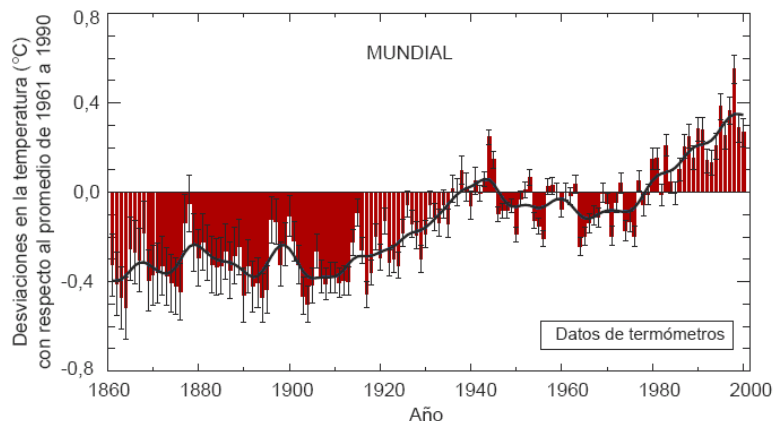


Figura 3.1: Anomalías en la temperatura anual promedio del aire en la superficie terrestre y en la superficie del mar en $^{\circ}\text{C}$ en el período de 1861 a 2000, en relación con el período de 1961 a 1990. Se muestran barras de error de estimación correspondientes a dos desviaciones típicas. Tomada de Folland et al. [2001].

bles y/o regiones el registro es mucho más corto, incluyendo algunas de las más críticas para la comprensión del cambio climático y su predicción. Por ejemplo, las series de humedad atmosférica en distintos niveles de la troposfera y diferentes regiones son bastante limitadas. Los ciclos biogeoquímicos en el océano, la biosfera y los suelos son relativamente mal observados.

En algunos lugares hay registros de precipitación, vientos superficiales y nivel del mar por casi 100 años. Las observaciones sistemáticas en altura tienen menos de 50 años y menor cobertura espacial. Hay alguna tradición de observaciones oceánicas de superficie desde hace unos 150 años con una cobertura que ha mejorado desde entonces. Desde 1970 se dispone de observaciones satelitales y de boyas que observan por debajo de la superficie del mar.

Además de los registros instrumentales se dispone de datos paleoclimáticos a partir de fósiles de polen, microorganismos marinos, espesor de anillos de árboles, composición isotópica de corales, sedimentos, capas de hielo, y composición de gases atrapados. Esto ha permitido la reconstrucción indirecta de la historia climática por cientos y hasta miles de años, con adecuada consistencia entre las diferentes fuentes.

3.2.2. Temperatura

El incremento global en la temperatura media de aproximadamente $0,6^{\circ}\text{C}$ desde el fin del siglo XIX ha ocurrido en dos períodos, de 1910 a 1945 y desde 1976

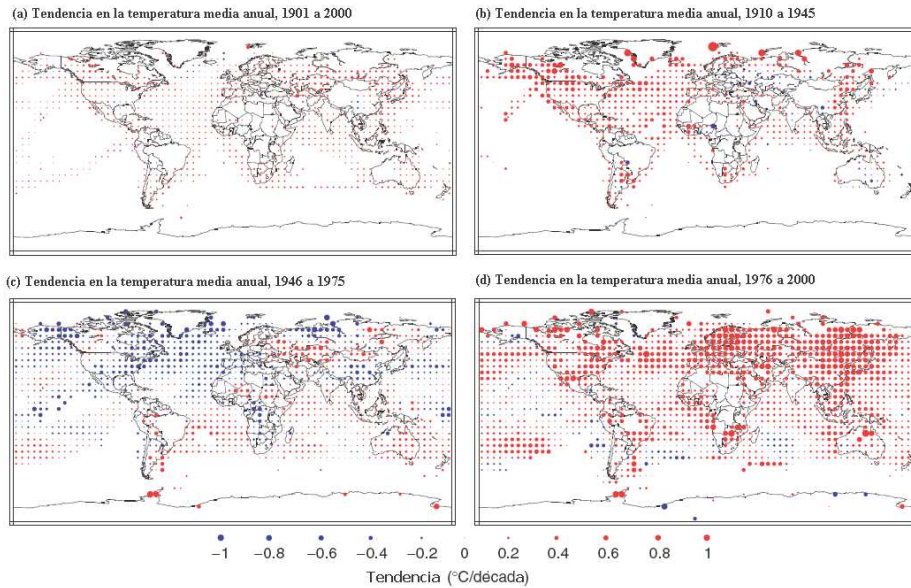


Figura 3.2: Mapa de la tendencia en la temperatura anual promedio del aire en la superficie terrestre y en la superficie del mar en $^{\circ}\text{C}$ por década representada por el tamaño y el color de un círculo según la escala gráfica. Los cuadros (a) a (d) representan respectivamente las tendencias estimadas para los períodos 1901 a 2000, 1910 a 1945, 1946 a 1975, y 1976 a 2000. Las tendencias se estimaron de anomalías promedio en cada grilla con requerimiento de que los promedios incluyeran al menos 10 datos. Para el período de 1901 a 2000, las tendencias se estimaron sólo para los puntos que tenían al menos 66 años de datos. El límite inferior en el número de datos para los otros períodos fue respectivamente de 24, 20, y 16 años. Tomada de Folland et al. [2001].

en adelante (ver Figura 3.1). El incremento en este último período ha sido a una tasa mayor y principalmente en las zonas extratropicales del Hemisferio Norte. El calentamiento asociado al evento El Niño de 1997–1998 sobresale en el registro. La confiabilidad en esta estimación del calentamiento es alta, teniendo en cuenta análisis de los cambios en uso del suelo y la urbanización. En particular el análisis de los datos de la temperatura del aire sobre zonas oceánicas es muy consistente, incluso si se usan métodos diferentes e independientes de observación y de corrección de sesgos. En suma, el calentamiento estimado es considerablemente mayor que la suma de todas las posibles fuentes de error. En el reporte de Folland et al. [2001] se entra en detalle sobre los aspectos técnicos de la estimación, se reportan las fuentes de los estudios específicos y se hace un amplio examen para justificar las conclusiones que aquí procedemos a resumir.

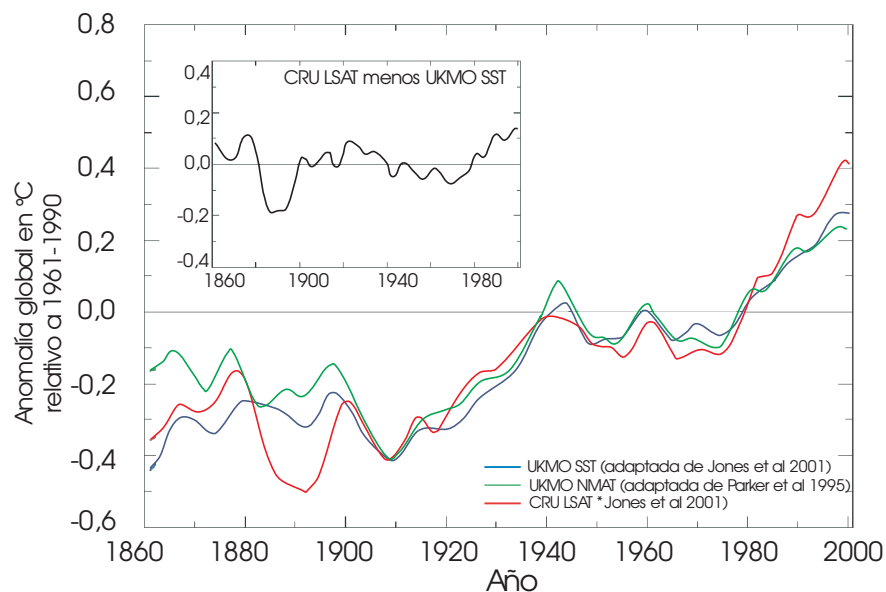


Figura 3.3: Series de tiempo suavizadas de las anomalías de temperatura global promedio de la superficie del mar (curva azul), aire marino en la noche (curva verde) y aire sobre la superficie continental (curva roja). Las series cubren el período de 1861 a 2000 y las anomalías son relativas a 1961–1990. El suavizado corresponde a un filtro binomial de 21 puntos que da aproximadamente los promedios decenales. En el inserto se muestra la diferencia entre las series correspondientes a continente y mar. Los datos provienen de varias fuentes, ver Folland et al. [2001].

En las zonas tropicales, las tendencias de calentamiento han sido consistentes durante todo el siglo XX (ver Figura 3.2). Sin embargo, en las zonas extratropicales los cambios han sido más variables. El calentamiento de 1910 a 1945 estuvo más concentrado en el Atlántico Norte y regiones cercanas. Durante el período de 1946 a 1975 el Hemisferio Norte se enfrió, mientras que el Sur se calentó. De 1971 en adelante el calentamiento fue simultáneo en todas las regiones, pero mayor en invierno sobre los continentes del Hemisferio Norte. En parte, los patrones de calentamiento en el Hemisferio Norte pueden estar relacionados con la fase Oeste positiva de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) Folland et al. [2001] y a la correspondiente oscilación decenal en el Pacífico. El calentamiento del mar en el Atlántico Norte desde 1980 parece estar asociado a la oscilación interdecenal (NAO). Este calentamiento del mar afecta a Europa.

Existe una larga tradición de medición sistemática de la temperatura superficial del mar en las rutas de los barcos. Esto ha permitido consolidar una base

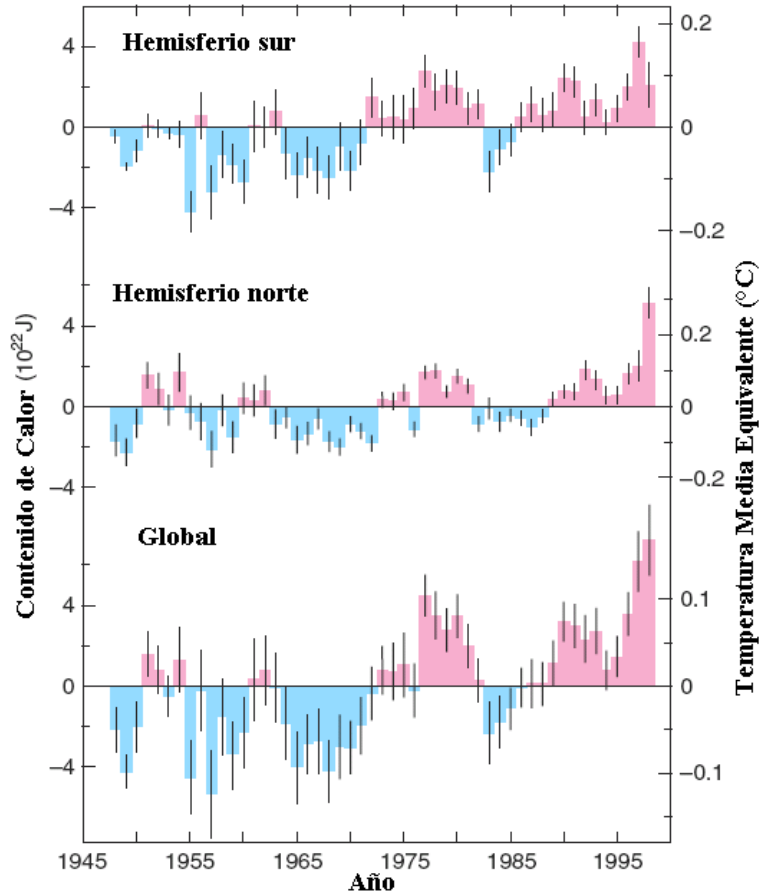


Figura 3.4: Serie de tiempo del contenido de calor del océano en los 300 m más superficiales (anomalías) para los dos hemisferios y el globo. Note que $1,5 \times 10^{22}$ J equivale a un promedio de 1 Wm^{-2} al año, sobre toda la superficie terrestre. Las líneas verticales al rededor de cada estimación corresponden a más o menos una desviación estándar del error. Tomada de Folland et al. [2001].

de datos global de aproximadamente 100 años de longitud, con algunos sitios de mayor y más larga cobertura. La Figura 3.3 muestra las tendencias en la serie de temperatura en la superficie de manera separada entre mar y tierra, con diferentes procedimientos de estimación. Como se aprecia, las tendencias son consistentes. Este análisis en particular da confianza para descartar la influencia de la urbanización en el análisis del registro. Las series sobre mar no tienen este efecto y por dos métodos independientes confirman la tendencia de calentamiento.

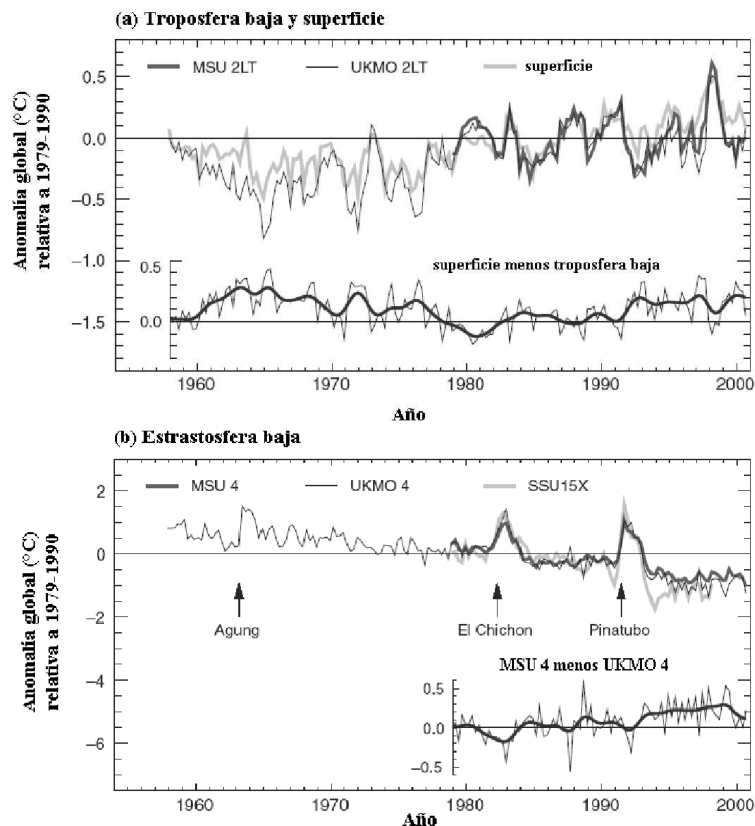


Figura 3.5: (Arriba) Anomalías del promedio global de temperatura para el período 1958 a 2000, relativas al promedio de 1979 a 1990 en la baja troposfera y la superficie. Observaciones de satélite (MSU 2LT) y de globos meteorológicos (UKMO 2LT). En el gráfico inferior se muestra la diferencia entre la temperatura de superficie y la de la baja troposfera (promedio de globos y satélites). (Abajo) Semejante a la anterior, pero para la baja estratosfera, calculada de datos de satélites (MSU 4 y SSU 15X) y globos (UKMO 4). La épocas correspondientes a las principales erupciones volcánicas están señaladas. En la parte inferior se muestra la diferencia entre los dos métodos de observación. Tomada de Folland et al. [2001].

En los últimos 20 años las zonas continentales se han calentado más rápido que las oceánicas. Esto puede obedecer a efecto antrópico o a oscilaciones multidecenales. Pero nuevos estudios indican que el calentamiento observado en la superficie del mar desde 1950 realmente obedece a un incremento global en el contenido de calor oceánico, superpuesto a una variabilidad decenal sustancial. Más de la mitad del calentamiento está en los 300 m más superficiales y corresponde a un calentamiento de unos $0,037^{\circ}\text{C}$ por década (ver Figura

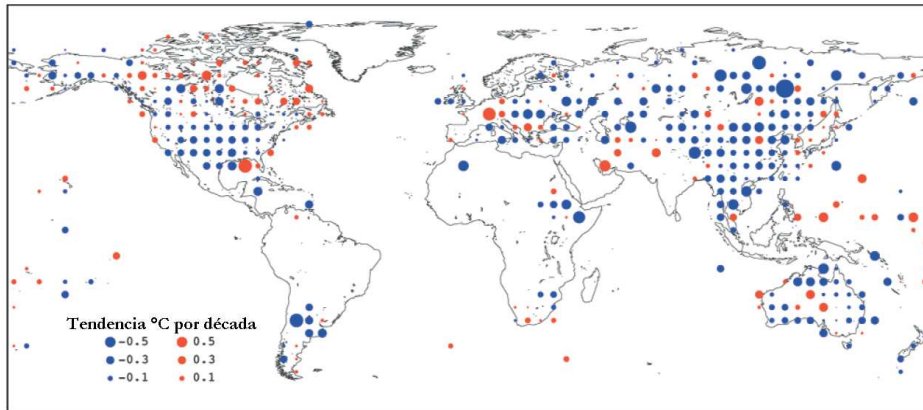


Figura 3.6: Tendencia del promedio anual del rango diurno de temperatura (diferencia entre el máximo y el mínimo) de 1950 a 1993, sólo para estaciones no urbanas, para obviar el problema de las islas de calor. El tamaño del círculo representa la magnitud de la tendencia según la escala indicada, el color azul representa decrecimiento y el rojo incremento. El conjunto de datos es más reducido que para el caso de las temperaturas medias. Tomada de Folland et al. [2001].

3.4). Folland et al. [2001] reporta algunos estudios que indican que el calentamiento ha penetrado a capas más profundas del océano, con diferentes tasas según la cuenca y variabilidad decenal importante. Además de la importancia que tiene la consistencia de la señal de calentamiento entre tierra y mar, la inmensa inercia térmica del océano terrestre es determinante para la respuesta del sistema climático al efecto antrópico.

Las observaciones en altura de la atmósfera tienen mayores dificultades que para el océano. Las mediciones se realizan mediante globos meteorológicos sólo en algunas regiones relativamente limitadas desde comienzos del siglo XX. Más tarde, mediante el uso de instrumentos sofisticados a bordo de satélites se adquirió una capacidad de observación mayor. Estos últimos tienen la evidente ventaja de una cobertura global, pero son relativamente recientes, de fines de los años 70.

La Figura 3.5 presenta la estimación de los promedios de temperatura global para diferentes capas. El efecto de las erupciones volcánicas mayores es evidente en este registro (Agung, 1963; El Chichon, 1982; y Pinatubo, 1991). Igualmente se aprecia un desplazamiento hacia temperaturas mayores en la baja troposfera en comparación con la superficie a fines de la década de los 70. Luego sigue un período de mucha variación en ambas debido a los fenómenos ENSO, en particular el evento de 1998. Después del desplazamiento al fin de los 70, la tendencia general de la temperatura troposférica ha sido constante,

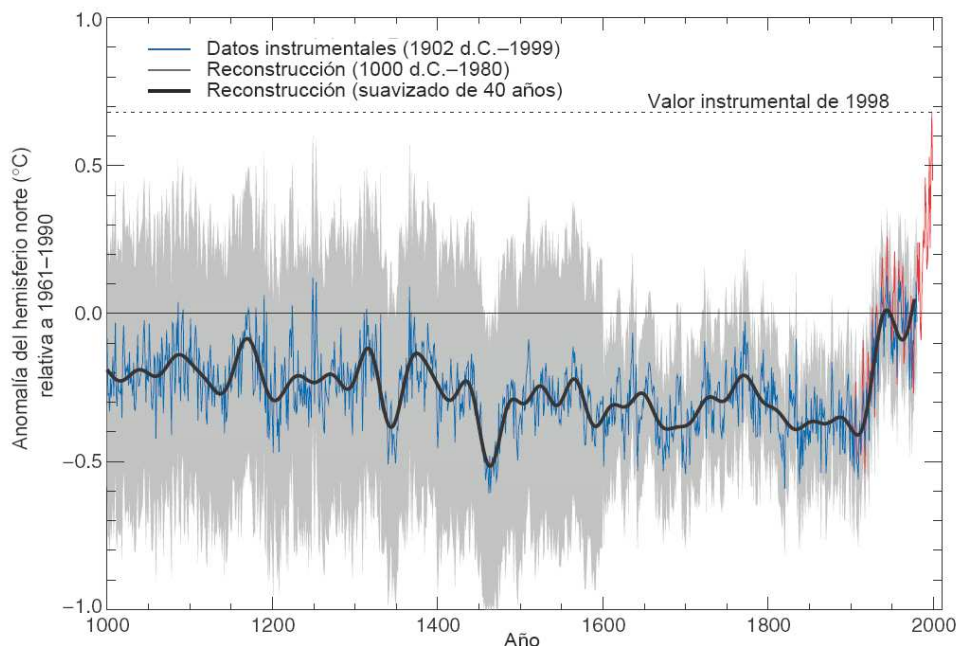


Figura 3.7: Reconstrucción de la temperatura en °C del Hemisferio Norte en el milenio apartir de registros de anillos de crecimiento de árboles, corales, muestras de hielo y registros históricos (azul) y datos instrumentales (rojo) desde 1000 d.c hasta 1999. Se muestran una versión suavizada de la serie (negro) y el error de estimación correspondientes a dos desviaciones típicas (gris claro). Tomada de Folland et al. [2001].

a pesar del calentamiento de la superficie. Las variaciones globales en la baja estratosfera han sido más uniformes temporalmente. Aunque las erupciones volcánicas son muy evidentes. Los datos muestran un enfriamiento desde 1958 en esta capa ($-0,5\text{ °C}$ por década). En consecuencia, la superficie se ha calentado con respecto a la troposfera ($0,16\text{ °C}$ por década) en promedio, lo cual tiene una tendencia relativamente constante, y la estratosfera se ha enfriado con respecto a ambas.

Hay una reducción significativa en el rango diurno de temperaturas, porque las temperaturas mínimas han crecido a una tasa mayor que las máximas (ver Figura 3.6). El efecto invernadero debe reflejarse más en las temperaturas mínimas, que están directamente afectadas por el balance radiativo en la noche, dominado por la emisión de radiación de onda larga desde la superficie.

Para eliminar el efecto de la urbanización, el análisis se restringe a las series rurales. La tendencia creciente tanto para la máxima como para la mínima

es ligeramente menor que la que resulta si se incluyen todas las estaciones, reflejando el impacto de las islas de calor urbanas (una diferencia de $0,005^{\circ}\text{C}$ por década).

Para evaluar hasta que punto el calentamiento del siglo XX es inusual, es necesario ampliar el horizonte de tiempo. Dado que no hay registros sistemáticos es necesario recurrir a registros indirectos. Como se ha indicado, la paleoclimatología se ha desarrollado significativamente mediante la interpretación de registros fósiles de polen y otros microorganismos marinos, espesor de anillos de árboles, composición isotópica de corales, sedimentos, capas de hielo, y composición de gases atrapados. Tal evidencia permite reconstrucción indirecta de la historia climática por cientos y hasta miles de años.

El reporte Folland et al. [2001] incorpora una reconstrucción de la temperatura promedio del Hemisferio Norte en el último milenio y que se reproduce en la Figura 3.7, adaptada de Mann et al. [1999]. Los registros indirectos son más confiables y extendidos para este período; pues hay conocimiento de las condiciones astronómicas, de la variabilidad solar y de la historia de erupciones volcánicas. Se considera probable que las temperaturas fueran relativamente más cálidas en los primeros siglos del milenio en el Hemisferio Norte, pero no se cree que este período haya cubierto de manera simultánea a todo el globo, para ser comparable con el fin del siglo pasado. Igualmente, la pequeña edad de hielo, período a partir de 1400 que persistió hasta el siglo XIX, parece haber estado restringida a Europa y regiones cercanas al Atlántico Norte. Además, los picos de frío no fueron coincidentes entre las diferentes regiones afectadas. En contraste, el calentamiento del siglo pasado es una señal consistente en regiones, en tierra, mar y atmósfera. Con muy buena confiabilidad el anterior fue el siglo más caliente del milenio. Igualmente, la década de 1990 a 1999 fue también la más caliente del milenio. Esta conclusión se considera válida a pesar de los problemas que hay en los datos, la reconstrucción y los procedimientos de cálculo.

La reconstrucción de la composición de la atmósfera para el mismo período de 1.000 años indica que antes de la era industrial la composición de CO_2 permaneció estable, con una concentración al rededor de 280 ppm, valor inferior a la concentración actual de 370 ppm. Esta observación concuerda con la interpretación de que el calentamiento reciente obedece al efecto invernadero.

3.2.3. Ciclo hidrológico

A pesar de lo corto de los registros de satélite, se deduce que el área cubierta por nieve en el Hemisferio Norte ha disminuido en un 10% desde 1966, fundamentalmente debido a los cambios en primavera y verano. La Figura 3.8 basada en observaciones de satélite, muestra que la reducción en verano es fun-

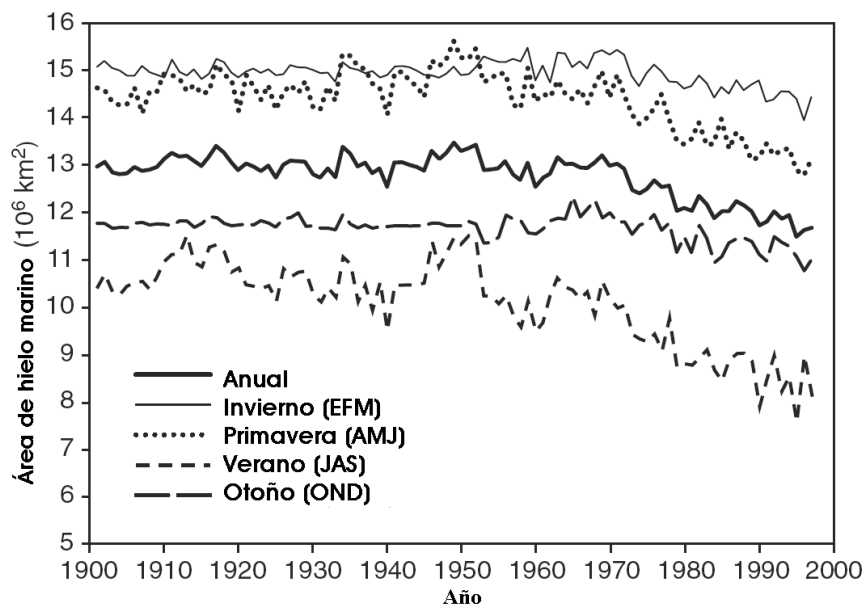


Figura 3.8: Series de tiempo del área cubierta por hielo marino en el Hemisferio Norte a nivel anual y para cada estación. Tomada de Folland et al. [2001].

damentalmente la causa de la disminución del área cubierta. La reducción es de aproximadamente el 15% del valor a mediados del siglo pasado. Este cambio es en primera instancia consistente con el incremento de la temperatura en las altas latitudes, incluyendo las regiones sub-árticas.

De los datos de satélite se desprende que relacionado con la disminución en el área, hay un decrecimiento en la duración de la temporada de hielo y el consecuente incremento de la duración de la temporada libre de hielo, que ha aumentado 5 días por década.

Aunque durante el último siglo el calentamiento promedio para toda la Antártica se estima en medio grado, la península Antártica se ha calentado más rápidamente, en más de 2 grados desde 1940. Este cambio regional ha producido una migración paulatina hacia el sur del límite de las capas glaciares. Este retroceso produjo el espectacular colapso del glaciar del Príncipe Gustavo y de partes del glaciar de Larsen en 1995, que sólo dejaron pequeños residuos. Después del colapso, la isla de Ross situada al norte de la península es circunnavegable por primera vez desde su descubrimiento.

A esto se suma una disminución significativa en el área de tundra y los glaciares de montaña. La Figura 3.9 ilustra el retroceso en la longitud de una muestra

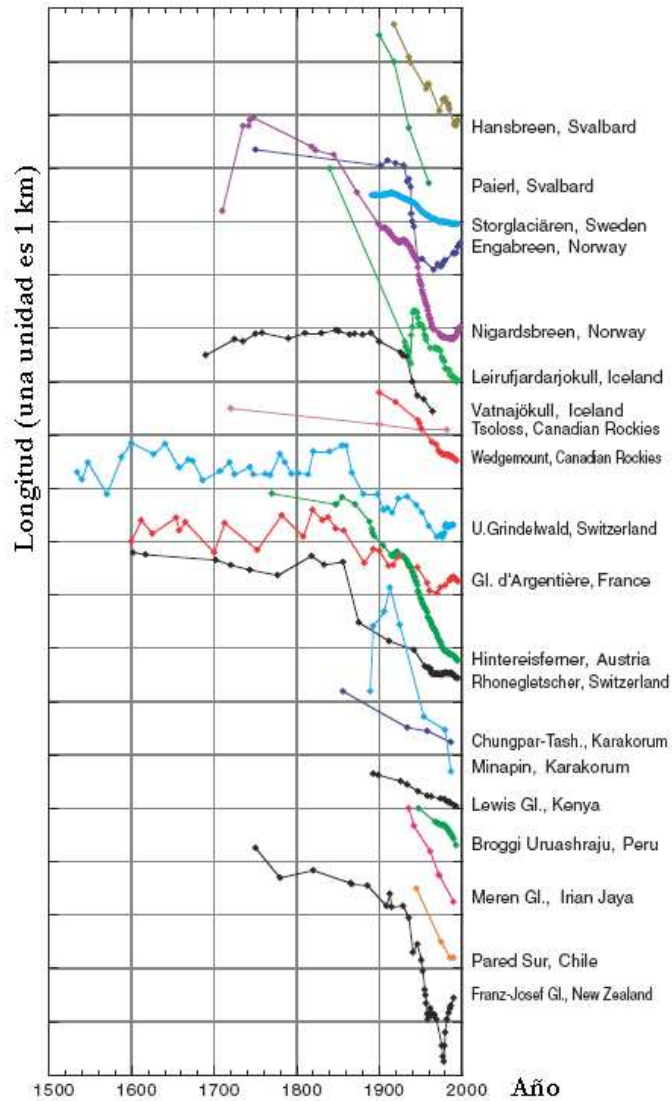


Figura 3.9: Una colección de registros de longitud de veinte glaciares en diferentes partes del mundo. Las curvas se han desplazado en el eje vertical para mejorar visualización en un solo cuadro. Datos de el Servicio Mundial de Seguimiento a Glaciares, tomado de Folland et al. [2001]. (<http://www.geo.unizh.ch/wgms/>)

representativa de glaciares de todo el globo. En Colombia las evidencias son en igual dirección. La información de los glaciares de montaña es particularmente importante porque complementa regiones sin registro instrumental y además en algunos casos hay series largas de observaciones. En los trópicos el retro-

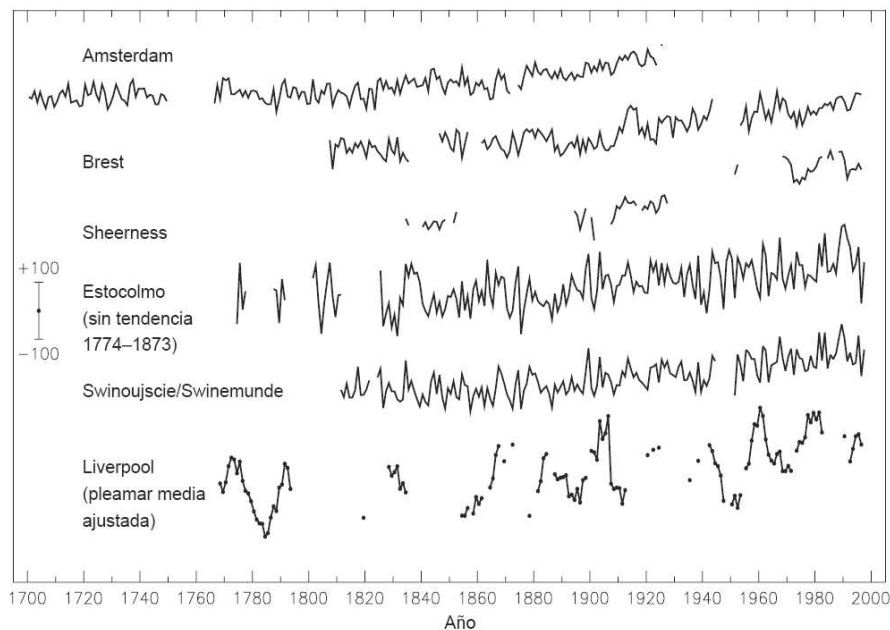


Figura 3.10: Serie de tiempo del nivel relativo del mar en los últimos 300 años en Europa septentrional: Amsterdam, Países Bajos; Brest, Francia; Sheerness, Reino Unido; Estocolmo, Suecia (sin tendencia en el período 1774–1873 para eliminar hasta el primer orden la contribución del levantamiento isostático postglacial); Swinoujscie, Polonia (antes Swinemunde, Alemania) y Liverpool, Reino Unido. Los datos de esta última son de la “pleamar media ajustada” que incluyen un término nodal (18,6 años). La barra de escala indica ± 100 mm. Tomada de Folland et al. [2001].

ceso generalizado contrasta con el reporte de que la alta troposfera no se ha calentado apreciablemente desde 1979. Los cambios en glaciares, nieve y hielo marino concuerdan de manera significativa con los cambios de temperatura, incluyendo la variabilidad interanual, excepto por el caso del incremento en temperatura en invierno (que ha ocurrido) y que no se refleja en disminución del área cubierta por nieve. El glaciar Antártico no ha disminuido de manera considerable, probablemente porque la temperatura allí ha cambiado muy poco.

Antes de considerar el cambio en el nivel del mar es del caso resumir el conocimiento que se tiene sobre cambios en el pasado más lejano. Desde el máximo de la última glaciación (hace unos 20 000 años) el nivel del mar ha ascendido aproximadamente 120 m en todas las regiones como resultado de la pérdida de masa de los glaciares. La tasa de ascenso se estima en unos 10 mm por año en los períodos de mayor ascenso, entre 15 000 y 6 000 años atrás. En los últimos 6 000 años el incremento del nivel del mar se estima ha ocurrido a una tasa de

0,5 mm por año, y a una promedio de 0,1 a 2 mm por año en los últimos 3 000 años.

Todavía hay movimientos verticales de la tierra por rebote elástico debido a la liberación de la carga de los glaciares derretidos. Basados en datos de registros de limnómetros se estima [Folland et al., 2001] que el nivel del mar en el siglo pasado ascendió a una tasa de 0,1 a 0,2 mm por año. La Figura 3.10 presenta algunos de los registros. El ascenso fue mayor en el siglo pasado que en el siglo XIX, pero no se deduce una aceleración significativa durante el último tiempo, a pesar de que hay variabilidad decenal.

Los factores que afectan el nivel del mar son: expansión térmica a masa constante, que se estima aporta en el siglo XX aproximadamente un incremento de 0,3 a 0,7 mm por año; cambios en la masa del océano por intercambios de agua con los glaciares continentales, que se estiman producen un incremento de 0,2 a 0,4 mm por año.

Las observaciones y los resultados de modelos indican que la contribución de los cambios en el glaciar sobre la Antártica, al cambio de nivel del mar durante el siglo XX, fue entre $-0,2$ y $0,0$ mm por año, como resultado de un aumento en la precipitación. Para el caso de Groenlandia la contribución se estima de $0,0$ a $0,1$ mm por año, como resultado de cambios en precipitación y escorrentía. Además ambos glaciares contribuyeron al cambio de nivel durante el siglo XX entre $0,0$ y $0,5$ mm por año como resultado de ajustes a cambios climáticos de más largo plazo. Los cambios en el almacenamiento de agua en los continentes en el período de 1910 a 1990 aportaron entre $-1,1$ y $+0,4$ mm por año al cambio en el nivel del mar.

La suma de estas componentes da un cambio eustático (correspondiente a cambio en el volumen del océano) en el nivel del mar de $-0,8$ a $+2,2$ mm por año para el período de 1910 a 1990. El valor central del rango es $0,7$ mm por año; el límite superior de esta estimación es cercano al límite superior de las observaciones ($2,0$ mm por año), pero el valor central es inferior al límite inferior de las observaciones ($1,0$ mm). Es decir, la suma de las componentes subestima en comparación con las observaciones. La estimación del cambio en la tasa (aceleración) es de $0,2$ mm por año por siglo, con un rango entre $-1,1$ y $+0,7$ mm por año y por siglo. Este resultado concuerda con las observaciones que indican cero aceleración durante el siglo XX. Las predicciones de incremento en el nivel del mar para el siglo XXI son: por expansión térmica de $0,11$ a $0,43$ m; por deshielo de glaciares continentales de $0,01$ a $0,23$ m; por Groenlandia de $-0,02$ a $0,09$ m; por la Antártica de $-0,17$ a $0,02$ m. Un rango total de incremento del nivel del mar entre $0,11$ y $0,77$ m. La amplitud del rango refleja la incertidumbre en los modelos.

El incremento global en la temperatura de la superficie muy probablemente conduce a cambios en la precipitación, la evaporación, la humedad atmosféri-

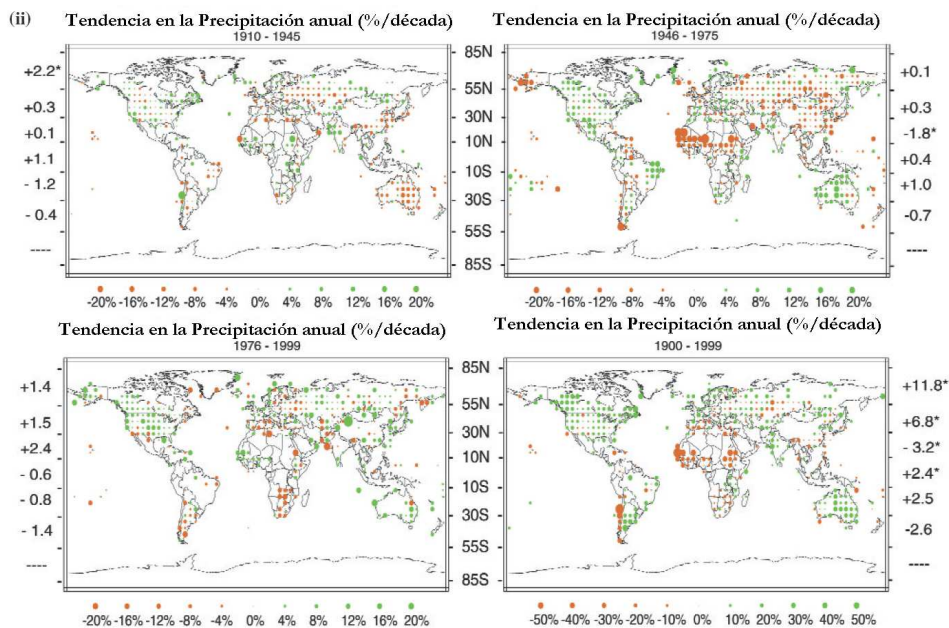


Figura 3.11: Tendencias entre 1900 y 1999 para la precipitación anual en diferentes celdas y bandas latitudinales. El área de los círculos es proporcional a la magnitud de la tendencia según la escala gráfica, el verde representa aumento y el café disminución. La tendencia se calculó, para cada celda de 5 grados de lado, a la serie del promedio de precipitación anual en la celda, expresada como porcentaje del valor normal para cada celda. En la leyenda lateral de cada mapa se muestra los promedios para seis bandas latitudinales (85N a 55N, 55N a 30N, 30N a 10N, 10N a 10S, 10S a 30S, y 30S a 55S). Los valores significativos en la tendencia, de acuerdo a una prueba-t al 5 %, se señalan con un asterisco. Tomada de Folland et al. [2001].

ca y todo el ciclo hidrológico. Las razones son los cambios en la circulación oceánica y atmosférica, y el incremento en la capacidad de la atmósfera para almacenar vapor de agua (Figura 2.4). El vapor de agua en la atmósfera es crítico desde el punto de vista climático por su papel como gas de invernadero y en la química de la troposfera y estratosfera. La medición de la precipitación, aunque relativamente rutinaria desde hace más de 100 años, tiene dificultades de cobertura espacial y algunos problemas técnicos en zonas con fuertes vientos. En particular sobre mar no hay cobertura con pluviómetros y sólo muy recientemente hay procedimientos de estimación mediante satélites. Se estima que la precipitación global sobre tierra ha tenido un incremento del 2 % desde el comienzo del siglo XX [Folland et al., 2001; y fuentes citadas]. Aunque este incremento se considera estadísticamente significativo, no es uniforme ni

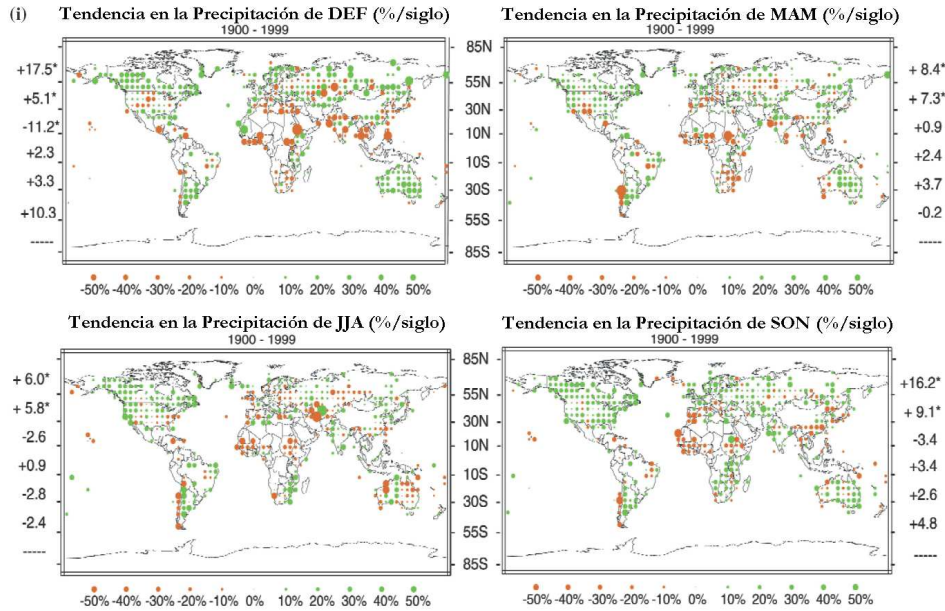


Figura 3.12: Semejante a la figura anterior, pero para los valores de precipitación de los trimestres indicados mediante la abreviatura de los meses correspondientes. Tomada de Folland et al. [2001].

en el espacio, ni el tiempo. Datos de más de 20 000 estaciones, con cuidadosa consideración de las dificultades de medición, fueron usados para estimar los cambios mostrados en las Figuras 3.11 y 3.12. Entre las varias observaciones que se pueden hacer sobre los cambios regionales resaltamos por su cercanía a Colombia la tendencia positiva de la precipitación del noreste de Brasil y el norte de la Amazonia en la estación lluviosa, aunque hay alguna evidencia de variabilidad interdecenal. Sobre la lluvia del monzón hindú no hay evidencia de tendencias de largo plazo. En Centroamérica la variabilidad ha sido irregular. Los principales ríos del sureste de Suramérica muestran incremento del caudal durante el siglo pasado, acompañado de una disminución significativa de la amplitud del ciclo anual. En el norte de África ha habido un patrón de sequía desde 1960, más persistente para la región occidental, aunque ha habido alguna recuperación de las lluvias durante los 90. Los análisis de los datos de satélite desde 1987 indican que en algunas regiones tropicales oceánicas ha habido incremento de la precipitación asociado a la frecuencia e intensidad de los eventos ENSO.

Aunque hay dificultad para analizar los cambios de largo plazo en la humedad atmosférica por la falta de datos, varios estudios recientes confirman la expec-

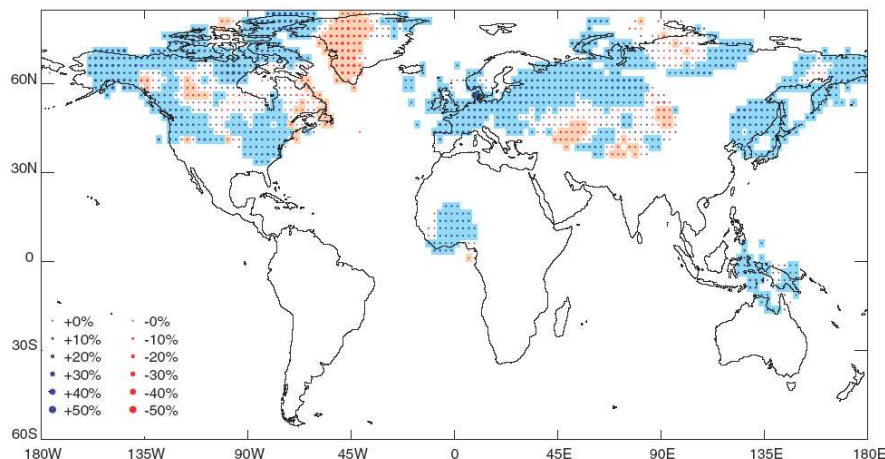


Figura 3.13: Mapa esquemático para representar las tendencias en los promedios anuales de la presión de vapor en la superficie, para el período 1975 a 1995. La tendencia se expresa como porcentaje de la media para el período 1975 a 1995. Las áreas sin puntos no tienen datos suficientes. Las zonas con sombra azul tienen tendencia creciente significativa, y con sombra café tendencia significativa decreciente. El tamaño y el color de los puntos representa la magnitud y el signo de la tendencia según la escala gráfica incluida. La calidad de la información puede dar lugar a dudas, por tanto el nivel de confianza de la estimación debe interpretarse con cautela. Tomada de Folland et al. [2001].

tativa teórica de su incremento asociado al calentamiento global. La Figura 3.13 muestra las tendencias de 1975 a 1995 en la presión de vapor media anual en la superficie. Note que hay pocos datos para el Hemisferio Sur, para el Hemisferio Norte la figura indica incremento generalizado. En algunas regiones hay tendencia decreciente, como en el este de Canadá que puede estar asociada a la fase positiva de la NAO. Además de los datos de estaciones reportados en la figura, algunos análisis de información de radio-sondas también indican tendencia creciente para la humedad atmosférica en la baja troposfera y cerca a la superficie. La magnitud del incremento se estima en varios puntos porcentuales por década en las estaciones más confiables del Hemisferio Norte. Los estudios de datos de globos meteorológicos y satélite indican un incremento de 1% por año para el período 1981–2000 para la humedad atmosférica por encima de 18 km, y para la alta troposfera tropical (entre 10N y 10S) se estima el incremento en 0,1% por año para igual período.

Los cambios observados en la evaporación son de disminución en los registros de tanque. Esto ha dado lugar a que se hable de una paradoja, debido a que argumentos simples indicarían aumento como consecuencia del calentamiento.

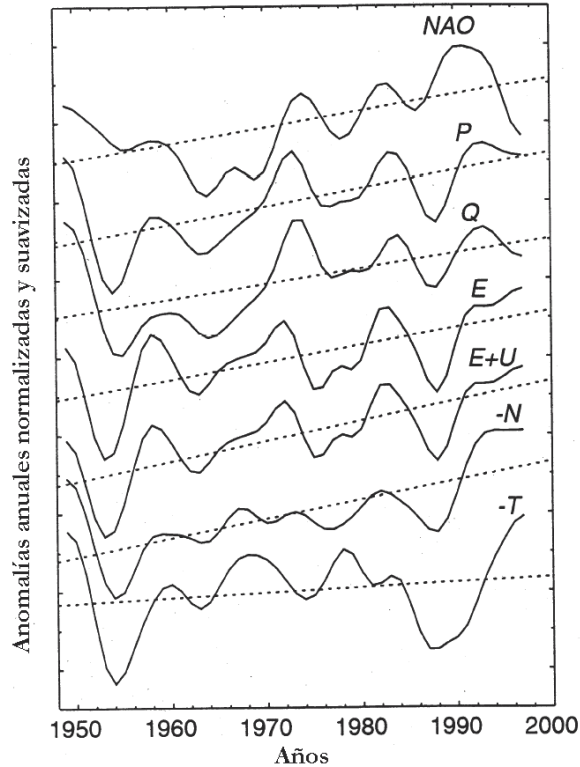


Figura 3.14: Series de tiempo de las anomalías normalizadas (con tendencias lineales) de las siguientes variables para la cuenca del Mississippi o para índices asociados: el índice de la oscilación del Atlántico Norte (NAO), la precipitación anual promedio (P), la escorrentía natural (Q), la evaporación natural (E), la evaporación total (E+U), U representa el uso consuntivo, la evaporación de tanque en el período mayo–septiembre (N), y la temperatura promedio en la cuenca (T). Para T y N la escala vertical está invertida. La suavización corresponde a un filtro binomial de 11 puntos, las anomalías son respecto a las medias mensuales, normalizadas por las respectivas desviaciones típicas. Tomada de Milly and Dunne [2001].

En realidad, la medición de los tanques evaporímetros está asociada más a una estimación de la evaporación potencial en lugar de la real. Hay razones teóricas [Hobbins et al., 2004] para justificar que existe una relación complementaria entre la evaporación potencial y la real, es decir la suma de ambas es una constante, por tanto si disminuye la potencial hay un aumento de la evaporación real. En general las tendencias en los datos de tanque no son en el mismo sentido en todas partes, como bien lo ilustran los análisis de Hobbins et al. [2004] y de Milly and Dunne [2001] (ver Figura 3.14 para la cuenca del

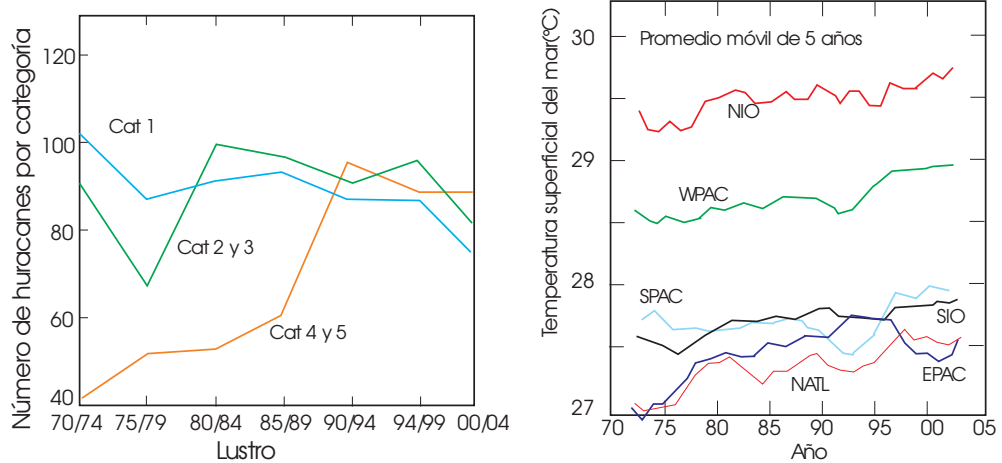


Figura 3.15: Izquierda: número total de ciclones tropicales por lustro y por categorías (1 en azul, 2 y 3 en verde, 4 y 5 en naranja). Derecha: serie de tiempo suavizada de las temperaturas superficiales del mar en cada una de las cuencas sobre las cuales ocurren los huracanes: el Atlántico Norte (NATL: 90 a 20E, 5 a 25N, de junio a octubre), el Pacífico Oeste (WPAC: 120 a 180E, 5 to 20N, de mayo a diciembre), el Pacífico Este (EPAC: 90 a 120W, 5 to 20N, de junio a octubre), el Pacífico Suroeste (SPAC: 155 a 180E, 5 a 20S, de diciembre a abril), el norte del Océano Índico (NIO: 55 a 90E, 5 a 20N, de abril a mayo y de septiembre a noviembre), y el sur del Océano Índico (SIO: 50 a 115E, 5 a 20, de noviembre a abril). La intensidad de los huracanes corresponde a la escala Saffir–Simpson. Adaptada de Webster et al. [2005].

río Mississippi).

Las tendencias en caudales de los ríos tampoco son geográficamente uniformes y dependen de los cambios tanto en la precipitación como en la evaporación real y del balance entre éstas. Los reportes indican tendencias crecientes en cuencas de latitudes medias en ambos hemisferios. Para las zonas tropicales los reportes no son concluyentes, pero hay reportes de tendencia decreciente en Colombia [Mesa et al., 1997]. Es importante al respecto no olvidar la incidencia de otras fuentes de cambio climático local o regional además del calentamiento global.

El caso de los ciclones tropicales (huracanes y tifones) merece especial mención en vista de evidencia adicional a la considerada en Folland et al. [2001] y de las implicaciones económicas y sociales. Webster et al. [2005] con datos de todo el globo muestra que la frecuencia de los ciclones de categoría 4 y 5 se ha prácticamente doblado en las últimas décadas (ver Figura 3.15).

Resultados en el mismo sentido fueron reportados por Emanuel [2005] sobre el incremento entre un 50 y un 80% en la energía media liberada por tormenta

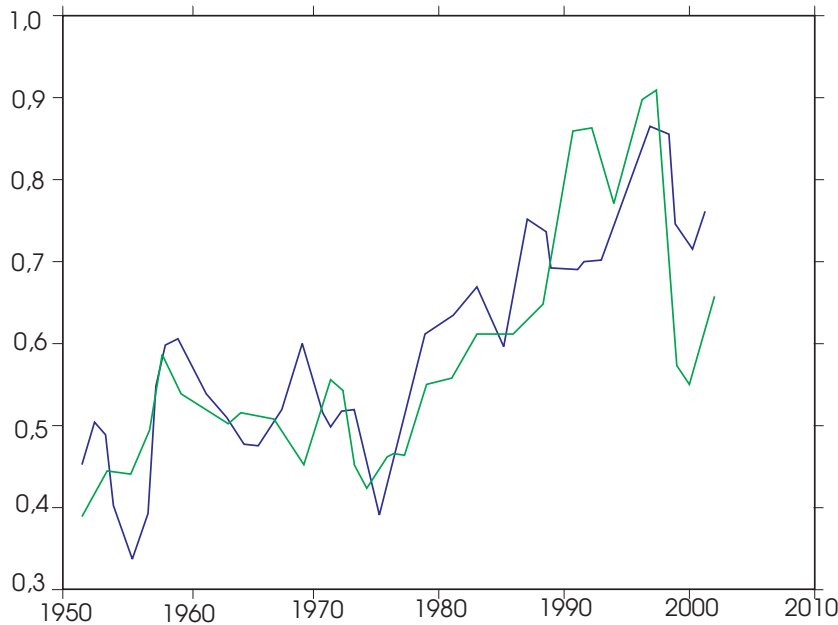


Figura 3.16: Series de tiempo de las anomalías en la temperatura del mar en la franja tropical correspondiente a latitudes entre 30N y 30 S (curva azul) y de la potencia disipada por los ciclones tropicales a nivel global, acumulada anualmente, una medida de la intensidad anual de los ciclones tropicales (escalada). La potencia disipada es proporcional al cubo de la velocidad de los vientos superficiales, integrando sobre la vida de cada tormenta. Detalles del análisis se encuentran en Emanuel [2005]. La figura se adaptó de <http://wind.mit.edu/emanuel/anthro2.htm>, que contiene algunas actualizaciones y correcciones respecto al artículo original.

en los últimos 30 años (ver Figura 3.16), a pesar de que el número total de tormentas se mantiene aproximadamente constante alrededor de 90 por año. También encontró que la velocidad del viento en estas tormentas se ha incrementado en un 15 % y que su duración también ha aumentado en un 60 %. Esta evidencia es clara, a pesar de las dificultades con los registros y a la posible variabilidad interdecenal.

La intensificación está correlacionada con el aumento en la temperatura superficial del mar en las regiones donde se desarrollan las tormentas. Esto sugiere que tal tendencia es una consecuencia del calentamiento global. La teoría de los ciclones tropicales en su estado actual de desarrollo proporciona algunos elementos útiles para comprender la relación entre los niveles de actividad ciclónica y el clima. La intensidad de un huracán particular, medida por la máxima velocidad superficial del viento, depende de complejos procesos que tienen que ver con su interacción con el mar y el ambiente atmosférico. Es posi-

ble determinar un límite teórico en la intensidad máxima que un huracán puede alcanzar. La distribución de la intensidad de las tormentas depende proporcionalmente de la intensidad potencial. Consideraciones elementales muestran que tal límite aumenta como resultado del calentamiento. Pero la magnitud del aumento está sujeta a incertidumbre por la complejidad de los procesos de retroalimentación involucrados, entre ellos la distribución vertical de la temperatura y la humedad en la atmósfera y los procesos de mezcla de aguas profundas y superficiales en el mar por efecto de los vientos de la tormenta.

En otras palabras, ni la teoría básica, ni los modelos numéricos de simulación están lo suficientemente avanzados para predecir de manera precisa los efectos del cambio climático sobre la actividad de los ciclones tropicales. En la sección siguiente se profundiza sobre este aspecto. Relacionado con este tema están los cambios en intensidad de otros eventos extremos de precipitación en los trópicos que comparten en alguna medida causas con los ciclones tropicales.

3.2.4. Antecedentes

¿Cuáles son los antecedentes a mayor largo plazo de cambio climático natural? ¿Hay registros de cambios drásticos? El clima desde el máximo de la última glaciación, aproximadamente los últimos 25 000 años, se ha estudiado con mayor detenimiento a partir de registros de núcleos de hielo en el centro de Groenlandia, Antártica, glaciares de montaña en China (Guliya) y Canadá, glaciares tropicales como el Huascarán en Perú, sedimentos de lagos en Europa, África, América, y Nueva Zelanda, y sedimentos y corales marinos. En algunos casos la resolución de los registros alcanza para obtener valores anuales. La Figura 3.17 [Folland et al., 2001] presenta un compendio de algunas de estas series. La variabilidad a escala milenaria es evidente. La correlación entre los diferentes registros es clara, aunque la amplitud de las oscilaciones o la época de los cambios no siempre coincide.

Un evento notorio se presentó hace unos 8 200 años cuando la temperatura en Europa y Groenlandia bajó varios grados. Este enfriamiento puede haber sido global, como lo reflejan otros registros. Hay otros casos de cambios abruptos, parece que relacionados con los patrones de circulación termohalina del océano. El Holoceno temprano fue en general más cálido que el siglo XX (hasta dos grados), pero la época del máximo varía según la región. En los registros de altas latitudes el máximo se presentó al comienzo del Holoceno (hace 11 a 10 mil años). En Nueva Zelanda el máximo se presentó hace aproximadamente 9 mil años. En Groenlandia el calentamiento no se presentó sino hasta hace 8 mil años.

El Holoceno parece ser el período cálido y estable de mayor duración en los últimos 400 mil años (como se puede deducir del registro en la Antártica). Las

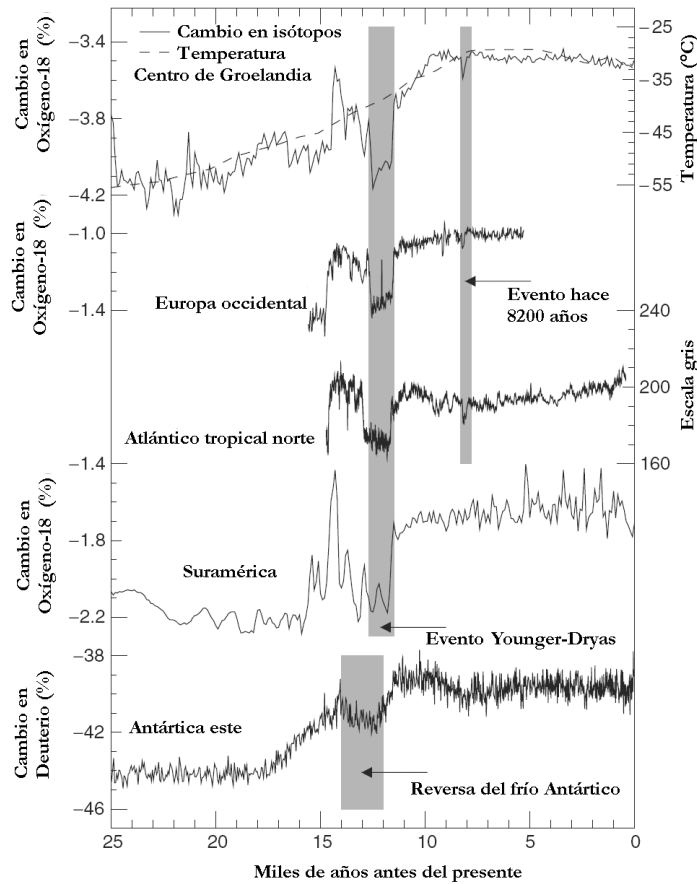


Figura 3.17: Registros de la variabilidad climática durante el Holoceno y la última transición climática, incluyendo los eventos de hace 8200 años, el llamado Younger Dryas y la reversa del frío antártico (regiones sombreadas). Los cambios en la concentración del isótopo de oxígeno-19 o del isótopo deuterio del hidrógeno son indicadores de la variabilidad climática. La escala gris para el Atlántico Norte tropical corresponde a una medida de la temperatura superficial del mar que se deduce del color de las capas de sedimentos ricas en plancton. Tomada de Folland et al. [2001].

implicaciones de esta estabilidad climática para el desarrollo de la civilización son profundas.

La manifestación más extrema de cambio climático en el registro geológico es la transición del máximo de la glaciación a las condiciones interglaciares. Todo indica que este calentamiento no fue uniforme. El pico de la última glaciación fue entre 25 y 18 mil años atrás. Las temperaturas actuales se alcanzaron hace unos 10 mil años. La deglaciación se alcanzó en dos intervalos principales, con

un retorno a condiciones más frías (Younger Dryas/Reversa del frío Antártico). En los registros de Groenlandia (GRIP y GISP2) la resolución anual muestra episodios de cambio muy rápido. Por ejemplo, el regreso a las condiciones frías del Younger Dryas después del primer calentamiento interglaciario, hace unos 13 000 años, tardó unas cuantas décadas o menos. El calentamiento subsiguiente que ocurrió hace aproximadamente unos 11 500 años al finalizar el Younger Dryas también fue muy abrupto. Según el registro, en unas décadas la temperatura se incrementó en unos 7 grados o más.

La evidencia actual sugiere que estos cambios y otros denominados eventos Dansgaard-Oeschger y Heinrich, están asociados a tres modos de funcionamiento de la circulación termohalina del Océano Atlántico Norte: (1) una condición cálida, que coincide con la actual, con generación de aguas profundas en los mares GIN (Groenlandia-Islandia-Noruega) y de Labrador; (2) una condición fría que corresponde a la fase fría de los eventos Dansgaard-Oeschger y al máximo de la glaciación, con formación de aguas profundas en el Atlántico Norte o en el mar de Labrador pero no en los mares GIN; y (3) una condición alternante, correspondiente a los eventos Heinrich, con poca formación de aguas profundas en los mares GIN o de Labrador.

La supresión de la convección en los mares GIN tiene un efecto profundo en la atmósfera de las altas latitudes en el Atlántico y las regiones afectadas por dichos cambios como el norte de África. Sin embargo, el transporte oceánico a través del Ecuador continúa removiendo calor del Atlántico Sur, para alimentar la formación de aguas profundas en el mar de Labrador. La supresión adicional de la formación de aguas profundas en el Atlántico Norte y el mar de Labrador restringe el transporte a través del Ecuador y mantiene el calor en el Atlántico Sur; la formación de aguas profundas ocurre al sur del área afectada o incluso en el Hemisferio Sur. Esta reorganización puede causar calentamiento en el Atlántico Sur y en las áreas viento abajo, produciendo un balancín con el Atlántico Norte. En síntesis, la evidencia indica que pueden ocurrir cambios rápidos en la circulación oceánica y atmosférica a escalas decenales aún sin interferencia humana.

A escala temporal mayor, pero importante para la comprensión del calentamiento global, es el registro de gases de invernadero durante cuatro ciclos de glaciación (más de 420 mil años) registrados en perforaciones en el glaciar de Vostok en el centro de Antártica oriental. Como se ve en la Figura 3.18, hay una fuerte relación entre las concentraciones de CO_2 y CH_4 , y la temperatura (estimada indirectamente a partir de la concentración de deuterio, isótopo de hidrógeno). Aunque algunos estudios indican que el calentamiento después del último máximo de la glaciación ocurre antes (entre 500 y 200 años antes) del incremento en los gases de invernadero, hay una incertidumbre importante de hasta 1 000 años en la datación del CO_2 . Podría ser incluso posible de acuerdo

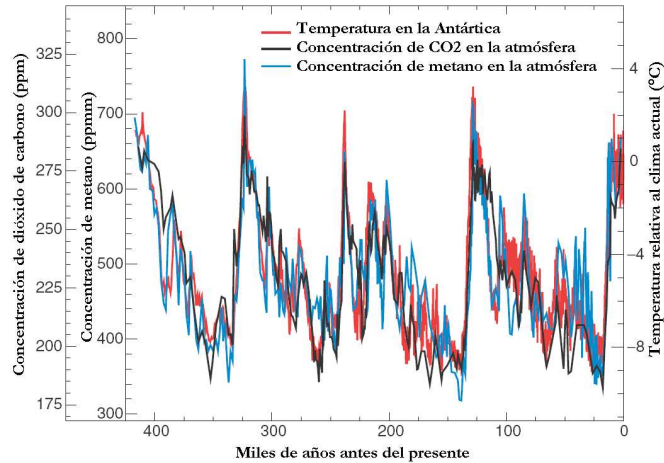


Figura 3.18: Variaciones de la temperatura y las concentraciones atmosféricas de metano y dióxido de carbono derivadas de aire atrapado en núcleos de hielo en la Antártica. Tomada de Folland et al. [2001].

a la evidencia disponible que el incremento de gases de invernadero fuera previo al calentamiento. Cabe entonces la pregunta si el efecto invernadero es un factor amplificador de las variaciones en insolación por cambios astronómicos, o si es la causa principal de los ciclos de glaciación [Archer et al., 2000]. En otras palabras hay lugar a cuestionar la teoría orbital de las glaciaciones de Milankovich. En cualquier caso es necesario explicar los ciclos en la concentración de estos gases invernadero (ver Sección 3.4). De la figura se puede deducir además que en todo el registro no hay antecedente de los niveles actuales de estos dos gases.

La frecuencia de ocurrencia del fenómeno ENSO ha fluctuado considerablemente durante los últimos 100 años. No es claro si el calentamiento global ha ocasionado un incremento o intensificación de los eventos El Niño, a pesar de la ocurrencia de los eventos particularmente intensos de 1982–83 y 1997–98 y el anormalmente prolongado de 1990 a 1995, y la poca ocurrencia de eventos La Niña entre 1976 y 1998. El análisis de las anomalías en la temperatura del Pacífico indica que aunque es posible que el calentamiento global haya aumentado la temperatura de referencia en las regiones afectadas por ENSO, hay variabilidad importante a escala decenal e interdecenal tales como la PDO que hacen parte del espectro continuo de ENSO en la variabilidad de la temperatura en el Pacífico tropical.

Algunos reportes indican que hay intensificación de los eventos extremos de precipitación en las regiones con incremento en la media. Igual reporte incluso

para zonas con disminución de la precipitación media, lo que se atribuye a una disminución del número de eventos. En general el tema de los eventos extremos ha merecido menos atención, en parte por la dificultad con la información. Respecto a eventos extremos en temperatura, se ha reportado una disminución del ciclo diurno y anual, en particular un decrecimiento de la frecuencia de eventos muy fríos. Esto se refleja en general en una tendencia a menores requerimientos para calefacción en invierno.

3.3. Futuro

3.3.1. Predicciones

El siguiente es un resumen de las predicciones del Reporte del IPCC para un horizonte de 100 años. Se consideran diferentes escenarios para los gases invernadero, que van desde los más optimistas hasta la extrapolación de la tendencia sin ninguna acción correctiva [Cubasch et al., 2001].

La superficie y la troposfera baja se calientan entre 1,4 y 5,8 °C, la estratosfera se enfría. En general, la tierra se calienta más que el océano y hay, en términos relativos, mayor calentamiento en las altas latitudes. El efecto de enfriamiento de los aerosoles modera el calentamiento, tanto local como globalmente. El calentamiento en el Atlántico Norte y en el Océano Antártico es menor en términos relativos que la media global.

A medida que que el clima se calienta, la cobertura de nieve y hielo marino decrecen. Los promedios globales de vapor de agua, precipitación y evaporación aumentan. La mayoría de las zonas tropicales reciben más precipitación, la mayoría de las zonas subtropicales reciben menos y en las altas latitudes más. La intensidad de los eventos de precipitación aumenta. Hay en general más sequía en el interior de los continentes en verano debido al aumento de temperatura y evaporación potencial, que no se compensa por aumento en la precipitación.

Una mayoría de modelos muestra comportamiento tipo El Niño en el Pacífico tropical, con las temperaturas en el centro y el Este aumentando más que en el Oeste, con el correspondiente desplazamiento hacia el Este de la precipitación. Los estudios disponibles indican aumento de la variabilidad interanual en la precipitación del monzón.

Con el calentamiento hay temperaturas máximas extremas más frecuentes y mínimas extremas menos frecuentes. El rango diurno de temperatura disminuye, los mínimos crecen más que los máximos. La relación señal a ruido entre todos los modelos es mayor para la temperatura que para la precipitación.

La mayoría de los modelos muestran debilitamiento de la circulación termohalina, lo que contribuye a la reducción del calentamiento en el Atlántico Norte.

Aun en los modelos con debilitamiento de la circulación termohalina hay calentamiento en Europa.

Por termodinámica, las aguas profundas de los océanos tienen un respuesta muy lenta a los cambios en el forzamiento radiativo. En consecuencia, los modelos predicen que durante el siglo XXI, el calentamiento penetra a profundidad significativa sólo en las altas latitudes, donde la mezcla vertical es importante.

Las diferencias entre modelos son comparables a las diferencias entre escenarios de emisiones. La circulación termohalina se recupera en los escenarios con estabilización de concentración de CO₂. El calentamiento significa un aumento del número de días de aire acondicionado y una disminución de los días de calefacción. Para muchas áreas la temperatura máxima de 20 años de período de retorno aumenta, principalmente en zonas con disminución de humedad del suelo. Las zonas en las que hay aumento de la temperatura mínima de 20 años de período de retorno ocurren básicamente en áreas en las que retroceden la nieve y el hielo.

Los extremos de precipitación crecen más que la media, y el período de retorno de los eventos de precipitación decrece en casi todas partes (los eventos extremos se hacen más frecuentes). En Norte América por ejemplo, los eventos de 20 años de período de retorno aumentan de frecuencia al doble. En particular, los eventos convectivos más profundos se hacen más frecuentes y se intensifican. El mayor incremento en la intensidad es sobre tierra, en el verano de cada hemisferio, y en la zona de convergencia intertropical. Los modelos indican que entre 10S y 30S de latitud hay disminución de la precipitación sobre mar y parte de los continentes. Sobre tornados, granizo y descargas eléctricas no hay indicaciones claras en las predicciones porque estos fenómenos no están explícitamente representados en los modelos. Las reflexiones de Trenberth [1999] son particularmente importante con respecto a estos asuntos.

3.3.2. Incertidumbre

Si la situación es tan grave, ¿por qué se ha hecho tan poco? Aunque el problema está identificado claramente desde al menos hace 15 años, como se puede ver desde el primer reporte de IPCC [1990]. No se desconocen los esfuerzos importantes de los científicos, los diplomáticos, los foros mundiales, el acuerdo logrado con el Protocolo de Kyoto, su ratificación por 158 estados miembros que representan 61 % de las emisiones y que finalmente entró en vigencia en febrero de 2006. Pero la pregunta subsiste porque no parece que el Protocolo fuera a ser efectivo ante la ausencia de Estados Unidos y por la lentitud e ineficacia de las acciones. Hay respuestas fáciles, pero poco productivas, que no permiten ahondar en los asuntos. Por ejemplo, una respuesta obvia es que no

es del interés de Estados Unidos, o de sus gobernantes y que sin ellos cualquier esfuerzo es perdido. En lugar de entrar en debates inútiles es mejor profundizar la pregunta: ¿Será que el problema no es tan grave? Será que es grave y los científicos no lo han podido demostrar? ¿Será que no sabemos qué tan grave es? ¿Será que la incertidumbre que subsiste justifica la inacción o la renuencia de Estados Unidos y Australia? ¿Hay problemas de comunicación entre los científicos del cambio climático y el público en general? Obviamente hay asuntos políticos, el interés no es entrar a esa discusión en este lugar. Interesan más las preguntas científicas.

Una manera de acercarnos al asunto es tratar de entender los argumentos de quienes han defendido la inacción. Un excelente expositor ha sido Thomas Schelling, premio Nobel de Economía 2005. Vamos a resumir su posición expresada en Schilling [1993], para luego considerar las preguntas científicas. Schelling reconoce lo serio del asunto, resume la conclusión principal respecto al calentamiento, no lo pone en duda, pero pasa a afirmar que la traducción de tal calentamiento a cambios climáticos está llena de incertidumbres. Los cambios pueden significar calentamiento o enfriamiento en algunos lugares, los cambios en la circulación no están claros, en la lluvia menos. Dice que los modelos sólo pueden predecir cambios graduales, que no incorporan discontinuidades. Acepta la posibilidad de cambios bruscos, pero señala que no hay consenso entre los científicos para incluirlos en los modelos. Pasa a comparar los efectos del cambio climático con otros cambios, a valorar sus costos y el costo de las medidas de mitigación. Afirma que es muy probable que otros cambios (tecnológicos, económicos, sociales, políticos) sean mucho mayores. Luego establece que la parte del producto interno (PIB) susceptible a ser afectada por el clima (agricultura) es sólo del 3% (para Estados Unidos). Y concluye que aunque el efecto sobre estas actividades fuera drástico el impacto total sería menor. Pone de presente que incluso el efecto sobre la agricultura podría ser benéfico. Acepta que los impactos serían mayores en los países no desarrollados, que dependen hasta en un 30% de la agricultura, pero allí también hay incertidumbre. Acepta la posibilidad de impacto negativo sobre la salud, por enfermedades emergentes y transmitidas por vectores sensibles al clima. Sin embargo, si se extrapola el crecimiento económico de estos países, la vulnerabilidad disminuye y tal vez la mejor manera para ellos enfrentar el cambio climático es el desarrollo económico. Dice que los costos de mitigación se calculan en dos puntos de PIB a perpetuidad. Pasa a preguntar si a los habitantes de los países desarrollados les importa la suerte de los habitantes de los no desarrollados, que tal vez sería mejor dedicar los recursos a ayuda para el desarrollo. Sobre los argumentos de que el daño ambiental es severo e irreparable, esgrime la incertidumbre. Pasa luego a discutir alternativas, eficiencia de las medidas, a proponer acuerdos a su juicio con mayor posibilidad de éxito que

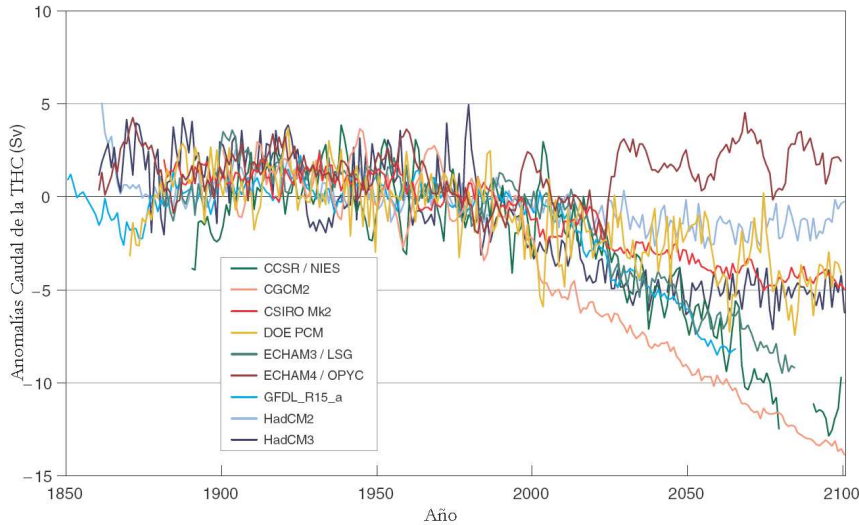


Figura 3.19: Caudal medio anual de la circulación termohalina del Atlántico Norte, resultado de simulaciones por diferentes modelos para un escenario de forzamiento por emisión de CO_2 . Se muestran anomalías respecto a la media del período (1961 a 1990). Tomada de Cubasch et al. [2001].

el Protocolo de Kyoto.

No hay duda que Schelling señala falencias en los estudios del IPCC: énfasis excesivo en la temperatura media como índice del cambio climático, falta de conclusiones sólidas sobre otras variables climáticas, talvez más relevantes desde el punto de vista práctico, como la precipitación y los eventos extremos en general. Aunque hay que reconocer que el nivel del mar, de impacto significativo, sí ha tenido un buen desarrollo en los estudios. De hecho ha recibido buena atención entre los políticos y la prensa. Pero sobre otros asuntos urgentes, por ejemplo sobre eventos extremos, las predicciones siempre van acompañadas de advertencias sobre la incertidumbre que subsiste, en correspondencia al estado de avance del conocimiento.

Para ilustrar la incertidumbre de los modelos como instrumentos para predecir el clima de los próximos 100 años ante escenarios de aumento de los gases invernadero, vale la pena considerar qué dicen sobre asuntos importantes, tanto desde el punto de vista climático como práctico; en particular sobre la circulación termohalina, el fenómeno ENSO, los eventos extremos de precipitación y los huracanes.

La posibilidad del debilitamiento, o incluso la supresión, de la circulación termohalina es un caso claro por las implicaciones para Europa, para la región que

circunda el Atlántico Norte, y para todo el clima global. Los eventos Younger Dryas en el registro paleoclimático así lo atestiguan. Pues bien, la intensidad de la circulación termohalina difiere entre los modelos hasta por factores de dos (ver Figura 3.19). Además la causa de tan amplias variaciones no es clara, probablemente está relacionada con los esquemas de parametrización de la mezcla a escala menor a la grilla de los modelos, o porque no se consideran fenómenos fundamentales [Cubasch et al., 2001].

Otro caso para ilustrar la incertidumbre en los modelos se refiere a las predicciones sobre ENSO. Algunos modelos predicen mayor frecuencia de eventos cálidos (El Niño), pero otros predicen mayor frecuencia de eventos fríos. Sobre la variabilidad, es decir sobre cambios en la amplitud o la frecuencia, nuevamente los resultados son contradictorios. La conclusión misma del reporte IPCC sobre el tema es contundente [Cubasch et al., 2001]: “para analizar los cambios en ENSO debe reconocerse que patrones semejante ocurren a una variedad de escalas desde la interanual hasta la interdecenal, con o sin cambios en el forzamiento por CO₂. Además existe variabilidad substancial a escala interdecenal y secular en corridas largas de los modelos sin cambios en las emisiones. Por tanto, atribuir cambios en la amplitud o la frecuencia de ENSO a forzamiento externo será muy difícil”.

Igualmente el reporte es claro en señalar las limitaciones de los modelos respecto a los eventos extremos: “aunque los modelos globales han mejorado con el tiempo, todavía tienen limitaciones que afectan la simulación de los eventos extremos en términos de resolución espacial, errores de simulación y parametrización de procesos que no se pueden representar explícitamente, particularmente con relación a nubes y a precipitación . . . Sin embargo, hay confianza en muchos de los aspectos cualitativos de las simulaciones porque tienen la capacidad de reproducir razonablemente bien muchas de las características observadas del sistema climático, no solamente en términos de los valores medios sino también con respecto a la variabilidad asociada a extremos” [Cubasch et al., 2001]. Además justifican las conclusiones apoyados en razonamientos físicos básicos: “Mucho de lo que muestran los modelos sobre el clima futuro para los diferentes escenarios de aumento de las emisiones de gases invernadero, en particular respecto a los eventos extremos, es lo que intuitivamente se puede esperar a partir de la comprensión básica de como funciona el sistema climático. Por ejemplo, el calentamiento de la superficie implica mayor cantidad de vapor de agua en la atmósfera y por tanto más lluvia y mayor intensidad para algunos de los eventos. Sin embargo, aunque los modelos pueden simular muchos aspectos de la variabilidad y los eventos extremos, todavía tienen muchas limitaciones y errores sistemáticos para simular adecuadamente el clima regional. Por tanto, es necesario tener en cuenta estas advertencias cuando se discuta sobre cambios futuros en eventos extremos” [Cubasch et al., 2001].

Respecto a huracanes, el reporte de IPCC [Cubasch et al., 2001] indica que los modelos de más alta resolución no tienen la capacidad de simularlos detalladamente. Las condiciones de gran escala necesarias para su desarrollo, que sí se pueden deducir de los modelos, indican incrementos modestos en la frecuencia, poco o ningún cambio en las áreas susceptibles, y alguna indicación de intensificación. Vale la pena citar a uno de los expertos en huracanes sobre la capacidad de los modelos [Emanuel, 2005]: “la física de los procesos que controlan el vapor de agua en la atmósfera está muy pobremente entendida y todavía más mal representada en los modelos. Lo que realmente ocurre en la atmósfera con la humedad es fundamentalmente ignorado por falta de mediciones adecuadas. El progreso en el entendimiento y en la capacidad de predicción del clima depende fundamentalmente de un mejor conocimiento de los procesos que controlan el comportamiento del vapor de agua y las nubes.” Es claro que todas estas afirmaciones muestran el sentido de responsabilidad de los científicos. No hay ánimo alarmista. Por el contrario, hay un celo por señalar las limitaciones, la necesidad de avanzar en el conocimiento.

Teniendo en cuenta tanto las predicciones como las calificaciones antes discutidas es claro concluir que frente al cambio climático global la humanidad está ante un asunto grave, por sus consecuencias, sobre todo asociadas a otras variables diferentes a la temperatura como el aumento del nivel del mar, los eventos extremos de precipitación, las sequías y la intensificación de los huracanes. También es claro que subsiste incertidumbre frente a estas predicciones, los científicos han sido precisos en señalarlas. Tal vez hay que reconocer que la evaluación de la gravedad de los impactos no ha tenido un desarrollo comparable al esfuerzo en los modelos climáticos. Igualmente respecto a la incertidumbre, que puede y debe ser evaluada. Sin duda hay mucho por mejorar respecto a la comunicación entre los científicos del cambio climático y el público en general. El asunto de la incertidumbre merece mayor análisis.

¿Cómo enfrentar la incertidumbre? La propuesta es pasar del principio precautelativo (prevenir y aplicar los medios necesarios para evitar o impedir un riesgo o peligro) a la metodología de la evaluación normativa permanente [Dupuy and Grinbaum, 2004].

El cambio climático ha puesto de presente nuestra capacidad de afectar, alterar, dañar, interferir sin invitación o derecho, desencadenar o precipitar una cadena de eventos en un sistema complejo que traen consecuencias indeseables. Es necesario desarrollar nuevos conceptos para enfrentar esta situación. La antigua virtud y sabiduría para determinar los fines y procurar los medios para alcanzarlos, conocida con el nombre de frenesí y predicada por Aristóteles, fue reemplazada en la práctica hace mucho tiempo por las herramientas modernas del cálculo de probabilidades, la teoría de decisiones [Smith et al., 2000], teoría de la utilidad etc.

Además, hay otros métodos más cualitativos como la prospección y la planeación por escenarios. Más recientemente el método del principio precautelativo emergió en el escenario internacional con la pretensión de aplicarse a los casos en los cuales la incertidumbre proviene de un estado de desarrollo insuficiente de la ciencia o el conocimiento.

Claussen et al. [2002] creen que ninguno de estos métodos es adecuado para tratar los asuntos relacionados con el cambio climático y que se requiere un nuevo método. Dicen que las bases conceptuales del método precautelativo son frágiles pues no se adecúan al tipo de incertidumbre que afrontamos, en particular el cambio climático abrupto. Aunque la incertidumbre es objetiva, no se trata de eventos aleatorios, cada catástrofe que nos amenaza es un evento único. Tampoco es aplicable la noción clásica de incertidumbre.

Es necesario tener en cuenta la dependencia a las condiciones iniciales propia de los sistemas caóticos deterministas. Además, la sociedad es un factor fundamental. De hecho, el esfuerzo de los científicos no es sólo por amor al conocimiento, sino que busca influenciar las políticas y cambiar la manera como afectamos el clima. Consideración en serio de estos asuntos requiere la teoría de control: las decisiones humanas dependen, por lo menos en parte, de las predicciones o anticipaciones que se hagan del comportamiento futuro del sistema climático. A su vez, éstas dependen de las decisiones humanas. El ciclo causal que aparece impide tomar la acción humana como una variable independiente. La propuesta es por lo tanto un balance entre esperar a que sea demasiado tarde para actuar si los efectos son muy perjudiciales y el actuar precipitadamente, sin total conocimiento de las consecuencias. La propuesta es una prescripción para vivir con una posible catástrofe para que no ocurra.

3.3.3. Una nueva ciencia

Los modelos actuales empleados para las predicciones del impacto del CO₂ son de diferente naturaleza, los más utilizados para la predicción climática son de la familia de los modelos de circulación global acoplada de la atmósfera y el océano. Las resoluciones espaciales y temporales son variables entre 1 y 10 grados para grillas horizontales, del orden de 10 capas verticales y entre varias horas y hasta meses para la resolución temporal. Estos modelos aproximan las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de la atmósfera y el océano mediante eficientes esquemas numéricos. Además tienen un conjunto de ecuaciones físicas o empíricas, llamadas parametrizaciones, para representar otros procesos que ocurren a escala menor que la resolución de los modelos, o para simular otros fenómenos menos conocidos. Tanto las ecuaciones diferenciales, como las parametrizaciones dependen de parámetros, muchos de los cuales no son observables y se ajustan para tratar de que los resultados sean tan cer-

canos como se pueda a un conjunto de observaciones de calibración. Existen procesos que no están tenidos en cuenta en los modelos. Las diferencias entre los distintos modelos están fundamentalmente en la discretización espacial y temporal utilizada y las parametrizaciones empleadas. Sin lugar a dudas en los últimos años ha habido un avance importante, aunque todavía adolecen de problemas y errores. A continuación se resume la evaluación de los modelos contenida en el reporte del IPCC [McAvaney et al., 2001]. Luego se presenta una reflexión crítica.

La evaluación realizada por el panel del IPCC es bastante exhaustiva, incluye comparaciones entre los diferentes modelos, comparaciones con observaciones y comparaciones cualitativas con climas pasados. La evaluación se concentra en las variables más importantes. Aunque los modelos simulen adecuadamente el clima presente y coincidan entre ellos en las predicciones para los escenarios de cambio climático (escenarios de doblado de CO₂ por ejemplo), no se puede concluir que las predicciones son automáticamente creíbles. Es posible que aspectos del sistema climático no incorporados o mal representados en los modelos sean importantes en esos escenarios.

La conclusión general es que los resultados de los modelos evaluados son creíbles para las condiciones medias actuales, así como para el ciclo estacional, para la mayoría de las regiones continentales y para la gran mayoría de las variables [McAvaney et al., 2001]. La nubosidad y la humedad atmosférica siguen siendo fuente significativa de incertidumbre, a pesar de los avances. Ninguno de los modelos supera definitivamente a los demás, es conveniente utilizar los resultados de un rango de ellos. Algunos experimentos y estudios del paleoclima permiten concluir que los procesos de retroalimentación clima-vegetación son de importancia y están ausentes de los modelos. Por ejemplo, los cambios en la vegetación en el norte de África durante el Holoceno medio fueron definitivos para el incremento de la precipitación del monzón. Sin embargo, no hay claridad si para el cambio climático de los próximos 100 años sea necesario incorporarlos. Aunque ha habido importantes mejoras, los procesos en la superficie están todavía relativamente mal representados. Algunas de las variables asociadas contribuyen significativamente a la incertidumbre de los modelos, en particular la evaporación. En general, la sensibilidad a los procesos de superficie es alta y tiene importante variabilidad geográfica. La dificultad es mayor en vista de la falta de observaciones para calibrar y verificar los modelos. Por ejemplo, la temperatura superficial es fuertemente dependiente de los procesos superficiales en los trópicos, mientras que en las altas latitudes está controlada por procesos atmosféricos.

En los últimos años ha habido mayor atención a los eventos extremos en los modelos climáticos. Pero desafortunadamente ninguno de los proyectos de inter-comparación incorporó este aspecto. Las comparaciones son difíciles por la

falta de una metodología consistente entre los diferentes modelos y la falta de resultados con suficiente resolución temporal (al menos diaria). La resolución espacial para los eventos extremos también deja mucho que desear. Además, no hay bases de datos con observaciones en la forma más expedita para la comparación con los resultados de los modelos. Esto ha llevado a que se usen los resultados del proyecto de re-análisis del clima como si fueran observaciones, aunque se sabe que ni siquiera la precipitación diaria está bien representada por estos modelos. Incluso hay dificultad para interpretar los resultados de precipitación, pues algunos argumentan que corresponden a promedios en la grilla y otros a datos puntuales. Dada la singularidad de los campos de precipitación este asunto no es de poca monta. Dai et al. [1999] usa el ciclo diurno para mostrar las deficiencias en la representación de los procesos críticos para la precipitación. La conclusión general de esta comparación es que a pesar de que los totales sean adecuados, lo logran por razones erróneas, luego los eventos extremos no están bien representados. Mayores detalles y otros asuntos pueden consultarse en McAvaney et al. [2001].

Hay una marca histórica muy grande en la comunidad climática que ha llevado a inflar el papel de los modelos. Sin desconocer su utilidad e importancia, los modelos tienen serios problemas de comprobación, complicación, escala y determinismo.

Los problemas de comprobación se refieren a la imposibilidad de verificación o rechazo por la cantidad de parámetros ajustables. La consecuencia más negativa de este problema es la imposibilidad de aprender de los errores, de las predicciones que no concuerdan con la realidad [Harte, 2002].

La dificultad de complicación se refiere a la excesiva incorporación de componentes y procesos que los ha hecho tan inescrutables como la misma naturaleza. Esta dificultad se combina con la anterior, porque no se ha verificado qué componentes son esenciales en cada rango de escalas o fenómenos, porque no se conoce el impacto de los valores particulares de los parámetros. Claro, el clima es complejo, no lineal, probablemente caótico, pero la estrategia de usar la fuerza bruta del super computador no necesariamente es la adecuada. En buena medida los modelos han ido creciendo por incorporación de cada vez más procesos. Es posible que se requieran muchos, pero se ha perdido el control. Un ejemplo notable es la diferencia entre los modelos de caja negra y los modelos globales de circulación para estudiar el ciclo del carbono en el océano. Las diferencias de resultados entre estos tipos de modelos se deben probablemente más a valores de parámetros que a la cantidad o fiabilidad de los procesos representados.

Los modelos son muy dependientes de la escala. Aspectos asociados a la circulación atmosférica, como la turbulencia y los cambios de estado, producen irregularidades intrínsecas en los campos espaciales que hacen que las aproxi-

maciones discretas desarrolladas para funciones suaves simplemente no funcionan. Lo más grave es que esos fenómenos, mal representados, son de primer orden desde el punto de vista práctico. Como queda claro en el caso de los huracanes. Nuevamente, la refinación de las grillas, con el consecuente costo numérico, no parece ser la solución.

Parte del problema viene de una concepción determinista ingenua. No se ha asimilado la necesidad de procesos estocásticos. Ni siquiera para la interpretación de resultados. Hay procesos a ciertas escalas que aunque no se pueden despreciar para estudiar fenómenos a otras escalas, su efecto aparece como un ruido aleatorio. Un ruido con estructura espacial y temporal, derivada de la física del problema y de su no-linealidad [Penland, 2003].

Es probable que la cultura de los modelos no desaparezca, pero con seguridad requiere transformarse. Algunas propuestas muy antiguas vienen de la Física. El enfoque de “Fermi” se refiere a la construcción de modelos que capturan la esencia del problema, pero no todos los detalles. Este enfoque aparentemente menos ambicioso porque los modelos resultantes son más simples, puede ir más lejos. Una característica fundamental de este enfoque es la comprobación. Una estrategia posible es acoplar variables que puedan substituir subconjuntos de variables de los modelos tradicionales. Harte [2002] pone en contexto la discusión con dos citas, una del ecólogo Aldo Leopold [1948]: “en términos de la física convencional, la gallineta es una millonésima de la energía o la masa de un acre. Pero, quite la gallineta y todo el sistema se muere”. La otra: “la perfección se logra finalmente, no cuando no hay nada para agregar, sino cuando ya no hay nada para quitar” es del escritor y aviador de Saint-Exupéry [1940].

En una reflexión Harte [2002], un físico formado en partículas elementales y dedicado a estudiar los impactos del calentamiento global en los ecosistemas, plantea la necesidad de una síntesis entre Darwin y Newton. Aparentemente hay diferencias grandes entre la Física y la Ecología. En la primera, mientras más se profundiza, más se simplifica, dominan las condiciones iniciales, los patrones universales, la búsqueda de leyes, es predictiva (a pesar del principio incertidumbre y del caos), son muy importantes los modelos idealizados. En la Ecología, mientras más se profundiza, más complejos son los sistemas, priman los factores históricos, las tendencias, hay resistencia a leyes, es una disciplina descriptiva, el entendimiento es muy importante, hay desprecio por caricaturas de la realidad. El estudio de casos particulares (un ecosistema, una especie, un lugar específico) es importante en Ecología, mucho menos en Física. La ciencia resultante de tal síntesis, la ciencia del sistema terrestre, busca responder preguntas profundas, importantes y prácticas, busca nada menos que una comprensión predictiva de este complejo sistema que incluye la biosfera, la hidrosfera, la litosfera, la atmósfera, y sin dejar de lado la sociedad humana.

Se apoya en las ciencias básicas de la Física, la Biología y la Química sobre las que se fundan la Ecología, la Climatología, la Hidrología, la Oceanografía, la Geología y la Biogeoquímica.

Esta nueva ciencia no puede escapar a la confrontación entre asuntos científicos y profundas cargas políticas [Harte, 2002]. Debe atender preguntas del calado de ¿Cómo afectará el cambio climático a la biosfera? ¿Cuál es el efecto del calentamiento en la emisión de carbono en los suelos? ¿Habrá cambio en el albedo por cambios en las especies dominantes de plantas? Debe predecir el signo y la magnitud de las interacciones clima-ecosistema a diferentes escalas espaciales y temporales. Debe proporcionar suficientes elementos de juicio para decidir sobre el futuro del uso de la energía. Se necesitan predicciones confiables a distintas escalas espaciales y temporales ¿Qué tan importante es la biodiversidad? Temas como el control de plagas, la regulación del clima, la importancia de la redundancia en las especies, los patrones espaciales. ¿Qué se requiere para un futuro sostenible? ¿Hay límites al desarrollo? ¿Existe el desarrollo sostenible? ¿Cómo alcanzarlo? Entre los temas importantes para esta nueva ciencia se incluyen las retroalimentaciones, la sinergia, la no-linealidad, los umbrales, la irreversibilidad, la delimitación espacial o temporal de dominios. Entre las dificultades está la imposibilidad de hacer experimentos.

Hay varias aparentes soluciones para evitar la interacción entre políticos y científicos, y los desafíos de esta síntesis. Por ejemplo, que la definición de las políticas que tengan impacto sobre el sistema Tierra sean tomadas por paneles de expertos. El riesgo que resulta tanto para la ciencia como para la democracia es inaceptable. Otra aparente solución es abandonar la pretensión de predecir, trabajar con escenarios, identificación de patrones y análisis históricos. No resuelve el problema porque habrá predicciones y el público pondrá atención sin importar su calidad, los que van a decidir requieren predicciones confiables. Otra salida aparente es forzar el marco newtoniano, mediante modelos detallados, acoplados, predictivos, condiciones iniciales y parámetros, mejorar capacidad computacional. En esas estamos, primero llega el futuro antes que la capacidad de predicción a un nivel tan confiable como en la física. Otra solución aparente sería el desarrollo de algoritmos inteligentes cuyos resultados simulen los fenómenos naturales y usar las simulaciones como base para la predicción y las decisiones. Pero esto no será convincente, es relativamente fácil generar patrones que se parezcan a lo que uno quiera. Otra, persistir en el esfuerzo para mejorar el conocimiento que ya tenemos y que es suficiente para determinar la magnitud de los impactos y las consecuencias para justificar respuestas de los políticos. Aunque hay evidencia, no sabemos lo suficiente. En conclusión, hay que trabajar por el desarrollo de esta nueva ciencia, construyendo sobre lo existente.

3.4. El ciclo del carbono.

3.4.1. General

El carbono juega un papel fundamental en la vida, los flujos de energía y el clima. Tiene la capacidad de formar compuestos estables como las proteínas y los carbohidratos que son los constituyentes básicos de la vida. Participa de la fotosíntesis en la conversión de la energía solar en compuestos orgánicos. La transformación y consumo de estos compuestos proporciona la energía para el funcionamiento de toda la biosfera. Los combustibles fósiles que proporcionan buena parte de la energía utilizada actualmente por el hombre son el resultado de la acumulación y transformación de carbono orgánico en épocas geológicas pasadas. En el clima, juega un papel importante a través del CO_2 y el metano en el calentamiento global por el efecto invernadero. Además, la evapotranspiración y la fotosíntesis están íntimamente relacionadas. Para entender cómo los cambios ambientales globales pueden afectar el ciclo del carbono es necesario analizar los flujos y los procesos fisicoquímicos y biológicos que conforman el ciclo del carbono. Las fuentes de lo que sigue son Prentice et al. [2001]; Archer et al. [2000]; Archer [2003]; Broecker [1983]; Carlson et al. [2001]; Takahashi [2001].

El concepto de ciclo se refiere a las complejas transformaciones y flujos entre las principales componentes del sistema climático. Estos flujos ocurren a diversas escalas de tiempo, desde las más cortas correspondientes a unos cuantos segundos en el flujo asociados a la fotosíntesis a través de los poros en la superficie de una hoja, hasta la escala geológica desde cientos de miles a millones de años, relacionada con los ciclos de las rocas incluyendo la meteorización y el volcanismo.

Los depósitos fundamentales son el océano, la atmósfera, la biosfera y la litosfera. En el océano el carbono se encuentra como carbono orgánico y como carbono inorgánico disuelto (CID). El carbono inorgánico está representado por el dióxido de carbono (CO_2), el ion carbonato (CO_3^{-2}) y el ion bicarbonato (HCO_3^-). Respecto al total de CID, cada uno de estos compuestos representa el 1, el 8 y el 91 % respectivamente. El carbono orgánico hace parte de los compuestos constituyentes de todos los seres vivos y los desechos que estos producen, incluyendo las conchas de carbonato de calcio (CaCO_3). En la atmósfera el carbono se encuentra fundamentalmente en la forma de (CO_2) y en menor medida como metano (CH_4). Sobre tierra el carbono está presente en las plantas y demás seres vivos, en los suelos y en los depósitos de rocas carbonatadas (CaCO_3 , CaMgCO_3 , FeCO_3 , etc.) y en los yacimientos de petróleo, carbón, gas natural y demás combustibles. De todos los depósitos, la litosfera es de lejos el más grande con un total de $10^{23} \text{ g} = 100 \text{ Zg}$ de C . El

océano tiene $39,98 \times 10^{18} \text{ g} = 39,98 \text{ Eg}$ de C. La biosfera terrestre (plantas y suelos fundamentalmente) tiene $2,19 \text{ Eg} = 2,19 \times 10^{18} \text{ g}$ de C, mientras que la atmósfera tiene $750 \text{ Pg} = 750 \times 10^{15} \text{ g}$ de C (recuerde que los prefijos Z, E, P y T en el sistema métrico se leen como Zeta, Exa, Peta y Tera respectivamente y corresponden a factores de 10^{21} , 10^{18} , 10^{15} y 10^{12}).

El flujo promedio anual (expresado en Pg de C por año) entre estos depósitos se estima en cada caso así: La atmósfera y el océano intercambian (90); la biosfera terrestre y la atmósfera intercambian (120) de C por año. Entre el océano y la atmósfera el intercambio se da por difusión molecular a través de la superficie. Hay flujo neto cuando hay desequilibrio entre las presiones parciales de CO_2 en las dos fases. Entre la biosfera de tierra y la atmósfera, el flujo está asociado a la fotosíntesis (producción primaria bruta) y a la respiración total. Estos intercambios de las magnitudes indicadas ocurren en cada uno de los sentidos y por tanto se equilibran. Flujos menores unidireccionales ocurren entre la biosfera terrestre y el mar (carbono orgánico en solución por los ríos, 0,4), la litosfera y el mar (en solución por los ríos producto de la meteorización, 0,2), y la atmósfera y el mar (en solución por los ríos, capturado por la meteorización, 0,2). El océano recibe pues un total de 0,8 disuelto en los ríos, la mitad en forma de ion bicarbonato como subproducto de la meteorización. Para cerrar el balance, el océano retorna 0,6 a la atmósfera como respiración (CO_2), y 0,2 a la litosfera en sedimentos que van al fondo y que eventualmente se recirculan en rocas carbonatadas (CaCO_3). Para cerrar el balance, la biosfera de la tierra toma de la atmósfera 0,4 adicionales, que fundamentalmente se fijan en suelos inertes via las plantas. A escala todavía menor hay emisión en volcanes y depósito de carbón orgánico fósil (combustibles).

El tiempo medio de residencia del carbono en cada uno de los depósitos es bastante diferente. Para la litosfera es tan grande que se considera inactivo. Para la atmósfera es del orden de 4 años, para el océano es del orden de 450 años, y para la biosfera terrestre del orden de 18 años. Estos cálculos asumen el más simple de los modelos lineales. Si se tiene en cuenta que el mar se divide en capas, una superficial bien mezclada, con una espesor entre 100 y 400 m, y otra profunda, los tiempos medios respectivos se estiman en 9 y 2.000 años aproximadamente.

3.4.2. Procesos en la biosfera terrestre

Los organismos vivos obtienen la energía para realizar trabajo, reacciones químicas, desarrollar tejido, contraer músculos, pensar, reproducirse, de dos maneras básicas posibles. Las plantas y algunos organismos unicelulares capturan la energía de la luz solar y la almacenan en moléculas de azúcar mediante la fotosíntesis. En esta reacción además de la luz usan CO_2 y agua, y produ-

cen O_2 y H_2 . Los insumos químicos son pobres en energía y los productos ricos. El oxígeno es liberado a la atmósfera, el hidrógeno es utilizado por las plantas para la manufactura de los carbohidratos. El resto de organismos no pueden tomar la energía directamente del sol y deben recurrir a consumir las moléculas ricas en energía contenidas en otros organismos, proceso conocido como respiración celular, en el cual se desdoblan azúcares y grasas mediante oxígeno y se libera CO_2 . Las plantas toman CO_2 de la atmósfera por difusión a través de las estomas de las hojas. Éstos son orificios ajustables para regular el flujo de agua (transpiración) que eventualmente puede ser un recurso escaso para la planta. Si el suministro de agua es adecuado, los estomas se abren; de lo contrario se cierran para reducir la evaporación, lo que también disminuye la entrada de CO_2 . La fotosíntesis se realiza en los cloroplastos mediante la clorofila en reacciones complejas en las que la enzima clave es el rubisco (la proteína más abundante e importante en la Tierra en la que el rubidio, Rb, juega un papel importante). Cuando las estomas están cerradas y hay luz, la fotosíntesis consume el CO_2 presente en interior de la hoja y eventualmente el rubidio reacciona con el oxígeno, se produce la llamada foto-respiración, un rezago de la evolución que degrada la eficiencia de la planta.

Como se indicó antes, se estima que la producción primaria bruta en tierra representa el equivalente de 120 Pg de C por año. La respiración autótrofa (la que realizan los productores primarios) utiliza la mitad de esta cantidad, la diferencia se conoce como producción primaria neta y corresponde al crecimiento observado de las plantas, que se incorpora en tejidos nuevos. Esta energía es consumida por los descomponedores, los herbívoros y demás integrantes de las cadenas tróficas. Como consecuencia el carbono retorna a la atmósfera por respiración heterótrofa, lo que equivale aproximadamente a 60 Pg de C por año. Para un ecosistema dado, la diferencia entre la producción primaria neta y la respiración heterótrofa se conoce como la producción neta del ecosistema, que representa la cantidad de carbono incorporada al ecosistema en ausencia de perturbaciones que lo remuevan como incendios o cosechas. Se estima una producción neta de entre 0,7 y 5,9 MgC/ha por año para los bosques tropicales y entre 0,8 y 7,0 MgC/ha por año para los bosques templados. Si se descuentan las cosechas, los incendios y otros procesos de pérdida de carbón para los ecosistemas y se integra el resultado se obtiene la producción neta de la biota. La estimación global en condiciones naturales previas a la revolución industrial corresponde a 0,4 Pg de C por año. Actualmente, como resultado de la quema de combustibles fósiles, esta cifra es mayor pues la biosfera terrestre actúa como sumidero neto de carbón, como se indicó en la Tabla 3.1.

Los cambios en el uso del suelo tienen impacto importante en el balance del carbono. En general se acepta que la deforestación es una fuente de carbono atmosférico. Antes de 1900, la intervención humana sobre los bosque ocu-

rrió fundamentalmente en las zonas templadas y boreales de Europa, Asia y Norte América. Más recientemente, la deforestación es fundamentalmente tropical. Actualmente en las zonas templadas puede incluso haber reforestación neta. Los cambios en la cantidad de carbono en los suelos están mucho menos estudiados. Algunos estudios indican que como resultado del calentamiento global los suelos pueden ser una fuente importante de carbono para la atmósfera. En las zonas húmedas, los cambios en el uso del suelo involucran cambios en los procesos que producen metano, que es un potente gas invernadero.

El incremento de la concentración de CO_2 en la atmósfera implica aumento en la eficiencia de la fotosíntesis, la tasa de reacción del rubisco con el CO_2 aumenta. Esto reduce la foto-respiración, es decir disminuye la tasa de reacción del rubisco con el oxígeno. Además, como los estomas pueden estar más cerrados hay menos evapotranspiración. También hay un efecto sobre la eficiencia en el uso del nitrógeno, pues cambia la relación carbono-nitrógeno en los tejidos. Se estima que ante un doblado de la concentración de CO_2 , la eficiencia en las plantas C_3 puede aumentar hasta el 33%. Las ganancias no son tan claras para las plantas C_4 . Esto puede llevar a cambios en los patrones espaciales de distribución natural de la vegetación, como ocurrió durante los ciclos de glaciación. El cambio antrópico en el ciclo del nitrógeno, por el uso de fertilizantes artificiales, ha significado un incremento en la productividad tanto de plantas, como de suelos. Es decir, su efecto ha sido de fijación (secuestro) de carbono atmosférico.

3.4.3. Procesos en el océano

El océano tiene 50 veces más carbono que la atmósfera. En consecuencia puede ser un amortiguador de la actividad antrópica. De hecho, la estimación actual es que ha absorbido hasta un 30% de las emisiones por quema de combustibles fósiles. En el pasado geológico se considera que el océano ha jugado un papel importante en los ciclos de CO_2 y metano. El equilibrio del carbono entre la atmósfera y el océano depende del resto de constituyentes de la sal marina, de como son usados por los seres vivos y de los procesos de retroalimentación asociados [Broecker, 1983]. Como se indicó, el intercambio con la atmósfera es por difusión molecular a través de la superficie, que es proporcional a la diferencia de presiones parciales. El coeficiente de proporcionalidad depende fundamentalmente de la velocidad del viento. El CO_2 es uno de los gases más solubles en el mar. Su concentración es sin embargo relativamente baja porque reacciona con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3), que en cuestión de milisegundos se disocia para formar ion bicarbonato (HCO_3^-) e ion carbonato (CO_3^{2-}). El equilibrio químico entre estas sustancias se puede escribir como



La suma de las tres formas constituye el carbono inorgánico disuelto, CID, que se distribuye aproximadamente en las proporción de 1 % CO_2 no iónico, 91 % HCO_3^- y 8 % CO_3^{2-} . Esta reacción mantiene el pH del mar en rangos estrechos y restringe la cantidad de CO_2 que puede tomar el océano de la atmósfera. De acuerdo a la reacción de equilibrio, al aumentar el CO_2 atmosférico aumenta el CO_2 disuelto en el mar, pero la mayoría termina como HCO_3^- y el contenido de CO_3^{2-} disminuye. Hay por tanto un amortiguamiento en la cantidad de CO_2 que se puede absorber. Al nivel actual, un incremento de 100 ppm (de 370 a 470 ppm) significa un aumento en el CID oceánico de sólo el 40 % del aumento que resultó de un incremento atmosférico de igual magnitud a partir de los niveles preindustriales (de 280 a 380 ppm). La alcalinidad, A, es una medida de las bases presentes; para el mar, $A = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]$ y otros constituyentes menores como iones de hidrógeno y de boro. Los cambios en la temperatura, la concentración de CID y la alcalinidad afectan la solubilidad del CO_2 . Además de las reacciones químicas de disociación del CO_2 , de los cambios en su solubilidad y del intercambio con la atmósfera, otros procesos físicos y biológicos afectan la concentración de CID en el mar. En particular la formación y disolución de carbonato cálcico (CaCO_3) y la fotosíntesis y respiración de los organismos vivos.

La ley de Henry expresa que la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión del gas en la fase gaseosa sobre el líquido. En general, la constante de proporcionalidad es inversamente proporcional a la temperatura. Para el caso del CO_2 , la solubilidad se disminuye a la mitad si la temperatura pasa de 0 a 20 °C. La ley de Henry también se aplica a la relación entre la concentración y la presión parcial. Por tal razón, a mayor temperatura del agua, menor presión parcial. La presión parcial del CO_2 depende también de la alcalinidad (inversamente) y de la concentración de CID (directamente). Por tal motivo el flujo neto en zonas frías tiende a ser de la atmósfera hacia el mar, y a la inversa en zonas calientes.

Como se indicó en la Sección 2.4, el océano se puede separar en una capa superficial, mezclada, en contacto con la atmósfera, iluminada por el sol; y otra profunda, más fría, densa, sin contacto con los gases atmosféricos y oscura. El intercambio de CO_2 con la atmósfera se da en la capa superficial. Hay varios procesos por medio de los cuales hay intercambio entre las diferentes capas. Como la capa profunda está sobresaturada de CO_2 , a estos procesos los han denominado bombeo de CO_2 , que se clasifican como físico, biológico y por flujo de carbonato.

La circulación oceánica en general contribuye al bombeo físico de CO_2 hacia la capa profunda. La circulación superficial transporta aguas más cálidas de bajas latitudes hacia latitudes altas. En el proceso el enfriamiento permite mayor flujo de CO_2 de la atmósfera y por tanto aumento de la concentración

y captura de CO₂ atmosférico. En ambos hemisferios, los mares entre los 40 y 60 grados de latitud son los mayores sumideros por el efecto combinado de fuerte diferencia de presiones parciales y fuertes vientos. La formación de aguas profundas con alta concentración de CO₂ en las altas latitudes contribuye a la exportación de carbono a la capa profunda. En las zonas tropicales y donde predomina la surgencia, como por ejemplo en el este del Pacífico ecuatorial, el flujo es del océano a la atmósfera. Durante los eventos cálidos El Niño, se ha observado una disminución significativa de este flujo, por debilitamiento de la surgencia de aguas profundas.

La cantidad de carbono contenido en la biota marina (3 Pg de C) es pequeña en comparación con el total de la biosfera. Sin embargo su papel es importante. Los mayores flujos entre la atmósfera y el océano están asociados a la actividad fotosintética, que se realiza en la capa superior por el fitoplancton. La producción primaria bruta se estima en un tercio del total para la Tierra. La producción primaria neta se convierte en partículas de materia orgánica, PMO (organismos vivos y desechos) y en materia orgánica disuelta, MOD. La producción primaria neta significa una disminución de CID. Sin embargo, buena parte de este carbono es respirado nuevamente por los organismos heterótrofos. De todas maneras, en regiones estratificadas (latitudes bajas y medias), parte de esta materia orgánica se exporta a la capa profunda por precipitación, lo que tiene un efecto importante en el intercambio de CO₂ con la atmósfera. En la capa profunda tiene tiempos de residencia mayores. Esta exportación reduce el CID en la capa mezclada. En la capa profunda la materia orgánica es respirada al ser consumida por zooplancton o peces, o remineralizada por bacterias. A este proceso se le conoce como bombeo biológico, y contribuye significativamente a mantener la distribución vertical de la concentración de CO₂, sub-saturada en la capa superficial y sobre-saturada en la profunda.

Debe tenerse en cuenta que al igual que se exporta C, también se está exportando el resto de elementos constituyentes de los organismos vivos, es decir nitrógeno, fósforo, hierro, hidrógeno, oxígeno, silicio y calcio. El ciclo del carbono está ligado al ciclo de estos constituyentes del mar. Se estima en 10 Pg de C por año la exportación bruta de PMO y MOD. La mayoría es remineralizado en los 500 m superiores de la columna de agua y regresa a la capa superior y eventualmente a la atmósfera a escala de meses a años, vía surgencia o mezcla. La fracción que cae hasta capas más profundas es la verdaderamente importante para el ciclo del carbono a escalas temporales mayores, de siglos o más. Además, una parte (menos del 1%) se deposita en el fondo marino y no es descompuesta por organismos de fondo. Se estima que sin la acción del bombeo biológico, la concentración de CO₂ atmosférico sería mayor a 500 ppm, en lugar de la actual de 370 ppm. La eficiencia de este proceso se puede afectar por la disponibilidad de otros nutrientes. Como en toda actividad biológica,

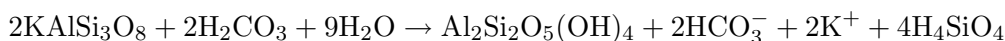
uno sólo de los varios insumos puede ser limitante para el desarrollo, y no necesariamente el aumento de alguno significa mayor productividad (hay holgura de elementos no limitantes). De manera semejante, la reducción de uno de los insumos no necesariamente disminuye la productividad. Experimentos recientes han mostrado que hay zonas con suficiente nitrógeno, fósforo y CO_2 , pero baja clorofila (Pacífico ecuatorial), donde es posible aumentar la productividad primaria mediante fertilización con hierro. Otro factor que puede afectar la eficiencia de este proceso es la estructura ecológica. Los primeros elementos de la cadena trófica son normalmente muy pequeños para formar partículas precipitables. A medida que se asciende en la cadena trófica se respira parte del carbono, lo cual disminuye la eficiencia. Algunos organismos con número trófico bajo son eficientes para precipitar, por ejemplo las diatomeas y radiolarios que generan conchas de ópalo (SiO_2). La disponibilidad de sílice, en forma de ácido silícico, puede ser limitante para el desarrollo de estos organismos.

El tercer mecanismo de bombeo de carbono hacia la capa profunda está asociado al flujo de carbonato. Realmente es parte del bombeo biológico, pero se acostumbra tratar aparte. Algunos organismos marinos fabrican conchas y esqueletos a partir de calcio y iones de carbonato. El compuesto resultante es carbonato de calcio (CaCO_3), que es denso y se precipita. Aproximadamente por cada 4 átomos de carbono que se precipitan como materia orgánica, uno cae como carbonato. Sin embargo, la remineralización de estos es muy diferente porque su concentración en el agua de mar es sobresaturada hasta profundidades del orden de varios kilómetros, sólo a profundidades mayores hay lugar a disolución. Esta profundidad se conoce como la profundidad de compensación por carbonato. Los sedimentos carbonatados se encuentran sólo por encima de tal profundidad, semejante a la altura de las nieves perpetuas en las montañas. En el Pacífico esta profundidad es de 1 a 4 km y en el Atlántico es de 5 km. En consecuencia, la cantidad de carbono sedimentado en rocas carbonatadas es del orden de cuatro veces la de sedimentos orgánicos.

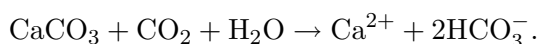
3.4.4. Procesos en la litosfera

La erosión continental consume CO_2 atmosférico mediante dos procesos principales: la erosión de carbono orgánico fijado en la biosfera y por la meteorización química de rocas que tiene como subproducto iones bicarbonato (HCO_3^-). Los ríos transportan hasta el mar este carbono en solución (orgánico, orgánico particulado o inorgánico). Se estima [Nemani et al., 2002] que la erosión continental representa una captura de CO_2 atmosférico de aproximadamente 0,60 Pg C por año, distribuido por partes iguales entre carbono orgánico disuelto, orgánico particulado y bicarbonato por meteorización. Adicionalmente por los ríos se transportan unos 0,09 Pg C por año del bicarbonato que se origina

de la disolución de rocas carbonatadas. El primer paso para la meteorización química es la formación de ácido carbónico a partir del CO_2 atmosférico y del agua presente en los suelos, que puede tener de 10 a 100 veces más C que la atmósfera. De acuerdo a las reacciones típicas de meteorización de las rocas, el consumo de moléculas de CO_2 es igual al flujo de moléculas de bicarbonato disuelto en las aguas que drenan rocas silíceas. Esto se puede ver por ejemplo para el caso de la ortoclasa,



El ácido carbónico proviene de $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$. Por otro lado el consumo de moléculas de CO_2 sólo es la mitad del flujo de moléculas de bicarbonato disueltas en las aguas que drenan rocas carbonatadas, como se ve para la calcita



Estos procesos son importantes a escala de tiempo de cientos a miles de años. En el pasado geológico se piensa que la meteorización química, que es afectada por la tectónica, la vegetación y la microfauna de los suelos, ha jugado un papel importante en la evolución del clima de la tierra. Por ejemplo, la tasa de meteorización es proporcional a la temperatura, tal que se duplica con un incremento de 10 grados. En el ciclo de las rocas existe también el proceso inverso, el metamorfismo, que libera CO_2 en volcanes y termales. Considerando en conjunto, se puede afirmar que se conforma un ciclo de retroalimentación negativo que tiende a estabilizar el clima. El aumento de CO_2 produce calentamiento, que aumenta la meteorización, que aumenta el transporte de bicarbonato al mar y en consecuencia el secuestro de CO_2 en sedimentos, lo que lleva a enfriamiento. En el sentido contrario la baja de temperatura que resulta de bajo CO_2 produce disminución de la tasa de meteorización y por tanto incremento del CO_2 por metamorfismo. En el Cenozoico se piensa que la aparición de las plantas angiospermas, los organismos marinos pelágicos y de las gramíneas tuvieron un efecto importante sobre la meteorización y la forma como se depositan los sedimentos de origen orgánico en el mar. La aceleración del ciclo hidrológico que acompaña el calentamiento también contribuye al mecanismo de retroalimentación negativo, pues actúa en el sentido de aumentar la meteorización química de las rocas y por tanto el secuestro de CO_2 .

3.4.5. Algunas Preguntas

Temas de fundamental importancia relacionados con el ciclo del carbono sobre los cuales hay mucho por aprender son: la predicción de los impactos del cambio en usos del suelo en los balances de carbono; la respuesta de la biosfera terrestre, en particular de los tipos de vegetación, de los suelos y del mar,

al incremento de la concentración de CO_2 atmosférico; la comprensión de los mecanismos detrás de los ciclos en la concentración del CO_2 atmosférico asociados a los ciclos de glaciación; el papel del metano; las relaciones del ciclo del carbono con otros ciclos biogeoquímicos; la fertilización en el mar.

3.5. Ejercicios

3.5.1. El funcionamiento de los estomas en las hojas es interesante. Estas estructuras están formadas por dos células guardas con un poro entre ellas. Las células guardas se expanden cuando toman agua y se contraen cuando están secas. Las dos células están unidas en sus extremos. Además, unas bandas de celulosa, más rígida, las envuelve y les impide expandirse lateralmente, y entonces sólo pueden alargarse. Por eso cuando absorben agua abren el poro y cuando se secan lo cierran. En particular parece que se requiere un mecanismo de control que sea sensible a la luz, el agua y el CO_2 . Consulte sobre la estructura de las estomas, el papel del potasio para cambiar la forma de las células guarda y los mecanismos de control.

3.5.2. Hay plantas adaptadas a clima cálido, más seco, que realizan la fotosíntesis por la vía C_4 . Investigue su evolución, su eficiencia con respecto a la vía C_3 , su distribución. Ante el efecto invernadero, ¿cuál de las dos vías está más adaptada?

3.5.3. Consulte sobre las relaciones entre fotosíntesis y evapotranspiración.

3.5.4. ¿Es el CO_2 un gas contaminante, es decir, tóxico o venenoso? Consulte la historia de la erupción del Lago Nyos en Camerún, en 1986.

3.5.5. Consulte sobre aplicaciones industriales del CO_2 , como por ejemplo el hielo seco, el pulido de superficies con chorro de hielo seco, en extintores de incendios, como preservativo en bebidas, como solvente, en levaduras, en la industria petrolera, como medio para generar lasers.

3.5.6. ¿Por qué el océano contribuye sólo con un tercio de la producción primaria bruta si tiene del orden de tres cuartas partes del área?

CAPÍTULO 4

Energía

Desde comienzos del siglo XIX la humanidad ha disfrutado de abundantes suministros de energía barata, fundamentalmente obtenida de depósitos de combustibles fósiles. Gracias a esta disponibilidad han sido posibles la revolución industrial, el crecimiento demográfico exponencial y el impresionante desarrollo tecnológico y económico que han ocurrido desde entonces.

En general, las opciones en energía caben en tres categorías: utilización de depósitos, bien sea de combustibles fósiles o de isótopos radioactivos, aprovechamiento directo o indirecto del flujo de radiación solar, y aprovechamiento de mareas. La primera está limitada por el tamaño finito de los depósitos y la segunda por la tasa finita a la cual podemos captar la energía solar, y el área que se puede dedicar a recibirla. Estrictamente, la energía que se usa no puede regenerarse, por lo tanto el término energía renovable es inexacto. Sin embargo se usará la denominación “fuentes renovables” según la práctica extendida. Como a escala de tiempo humano el flujo solar se puede considerar constante, todas las formas de aprovechar esta energía son inagotables, de allí el origen del término en comparación con la utilización de depósitos.

El don abundante de la energía ha marcado fundamentalmente a la humanidad, incluyendo la educación y las concepciones profundas de las ciencias sociales. Georgescu-Roegen [1971] consideró la relación entre economía y termodinámica y concluyó que la ciencia económica está fundada sobre la hipótesis de que el crecimiento no tiene límites. Hoy sabemos que los depósitos de combustibles fósiles no son ilimitados y que la atmósfera no es un depósito infinito para recibir el CO_2 producto de la combustión.

Pero no es sólo la economía, el sistema educativo se ha centrado en enseñar

cómo producir, distribuir, administrar y disfrutar de bienes y servicios bajo el implícito de la abundancia de energía. Hay poco énfasis en la ciencia básica, en el estudio de las leyes de la naturaleza, en los límites energéticos, en el diseño sistémico que no ignora las interacciones con quienes están antes, después y lateralmente a lo específico que se considera. El reconocimiento de los límites que el problema del calentamiento global ha puesto de presente implica que hay que rediseñar todo, construyendo desde lo existente. Esa es la única manera realista de enfrentar los retos actuales y asegurar la supervivencia de la civilización. El concepto de sostenibilidad debe penetrar en todo el sistema educativo. Este cambio mental no debería ser costoso si se compara con el costo de cambiar obras de infraestructura, maquinaria, o tecnología. Sólo que algunas veces lo que se pretende no existe, hay que crearlo, lo que tiene un orden de dificultad cualitativamente mayor, pero de eso se trata en la educación. Como dijo Wells [1920], “La historia de la humanidad cada vez más se convierte en una competencia entre educación y catástrofe”.

Hay mucha literatura sobre estos temas, las fuentes directamente utilizadas para lo que sigue son IEA [2004]; Weisz [2004]; Crabtree et al. [2004]; Lovins [2005]

4.1. Tendencias

El reporte de la Agencia internacional de Energía [IEA, 2004], que lleva como subtítulo “Seguridad energética en un mundo en peligro”, pinta un cuadro sombrío de cómo el sistema energético mundial probablemente evolucionará hasta el 2030. En resumen se tiene la siguiente situación: Si los gobiernos mantienen las políticas actuales, en el 2030 la demanda por energía será casi un 60 % mayor que la actual; los combustibles fósiles van a continuar dominando la canasta energética global, abasteciendo la mayoría del incremento en la demanda; la participación de la energía nuclear y de las fuentes renovables permanecerá limitada. El mayor crecimiento se presentará en los países en desarrollo. El transporte demandará la mayor cantidad de combustible fósil. La energía eléctrica crecerá por encima de todos los otros usos energéticos finales. La proporción de habitantes sin acceso a energía eléctrica se reduce significativamente pero sigue siendo grande al final del horizonte de tiempo considerado. La demanda por gas natural crecerá más rápido que la de los demás combustibles fósiles, pero el crecimiento de las fuentes renovables será todavía mayor. A pesar de que el incremento proyectado es significativo, los recursos energéticos de la Tierra son más que adecuados para abastecer la demanda hasta el 2030 y más allá; hay menor certeza sobre los costos para extraer y llevar a los consumidores esa energía. Es claro que los combustibles fósiles son finitos, pero estamos lejos de agotarlos; el petróleo mundial no se está agotando todavía; la mayoría



Figura 4.1: Precio en dólares del crudo de referencia en el último año.

de los estimativos de las reservas probadas son lo suficientemente grandes para abastecer la demanda proyectada para las tres próximas décadas; no hay consenso sobre el inicio de la declinación de la producción de petróleo antes del 2030. Las reservas de carbón y gas natural son todavía más abundantes; hay mucho potencial para descubrir nuevos yacimientos de todos los combustibles. Sin embargo, hay serias preocupaciones derivadas de las proyecciones del mercado; en particular, la vulnerabilidad con respecto a interrupciones del suministro se incrementa a medida que el intercambio internacional se expande. La emisión de CO_2 continuará con su efectos negativo sobre el clima por el calentamiento global, aumentando las preocupaciones por la sostenibilidad del modelo energético actual. Los países desarrollados signatarios del Protocolo de Kyoto tendrán dificultad en cumplir las metas; se estima que la emisión las excederá hasta en un 30 % y a nivel mundial hasta en un 15 %.

En 1956 el geólogo King Hubbert predijo que el pico en la producción de petróleo de los Estado Unidos de presentaría en la década de 1970. Predicción que se cumplió cabalmente, y desde entonces la producción ha declinado. Con igual metodología se ha pronosticado que: "La producción mundial va a alcanzar su punto más alto en una época no totalmente determinada entre el 2004 y el 2008, a partir de allí empezará a decaer para nunca recuperarse" [Deffeyes, 2001]. Esta predicción no concuerda con la conclusión arriba indicada para el conjunto de los combustibles fósiles [IEA, 2004], pero los precios que se han visto en los últimos años sí son un indicio de que de estamos cerca al pico.

El gas natural tiene reservas probadas mayores que pueden durar aproximadamente por otros 50 años. Sin embargo su distribución es bastante singular, puesto que el 58 % está en Russia, Iran, y Qatar, con contribuciones menores

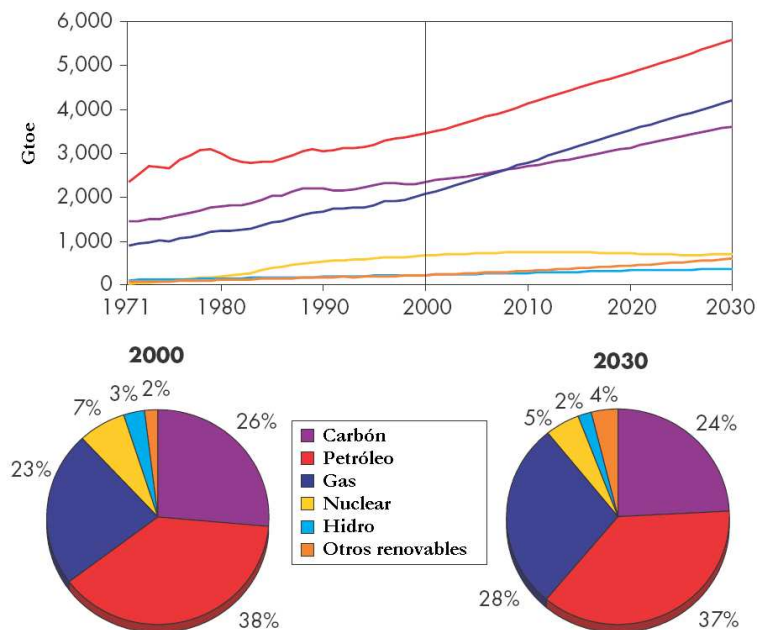


Figura 4.2: Crecimiento histórico y proyectado de la demanda global de energía para las principales fuentes. Proyección para el escenario de referencia. Datos en gigatoneladas equivalentes de petróleo (1 GTOE = 11,63 PWh=41,868 EJ). Adaptada de IEA [2004].

de muchos otros países. Por lo tanto, el consumo final está a grandes distancias de los centros de producción. El transporte transoceánico mediante licuación o conversión a otros combustibles líquidos apenas comienza a desarrollarse, pero es probable que sea importante en los próximos años, igual que toda la geopolítica de su producción y transporte.

La demanda por electricidad se duplicará en los próximos 30 años, con el más alto crecimiento entre las formas finales de uso energético. Su participación en la canasta de energéticos llegará al 22%, mientras que las de petróleo y del gas no cambiarán mucho y la carbón decrecerá. Muchos de los habitantes más pobres seguirán privados de los servicios energéticos básicos. Más de un cuarto de la población mundial no tiene acceso a la electricidad y dos quintas partes todavía dependen de la bioenergía para sus necesidades. Aunque la situación va a mejorar, en 25 años todavía casi 1500 millones de personas no tendrá electricidad. Esta gigantesca expansión requiere grandes inversiones.

Los riesgos de corto plazo para el suministro de energéticos van a incrementarse. Los asuntos geopolíticos y el alza en los precios son los ingredientes

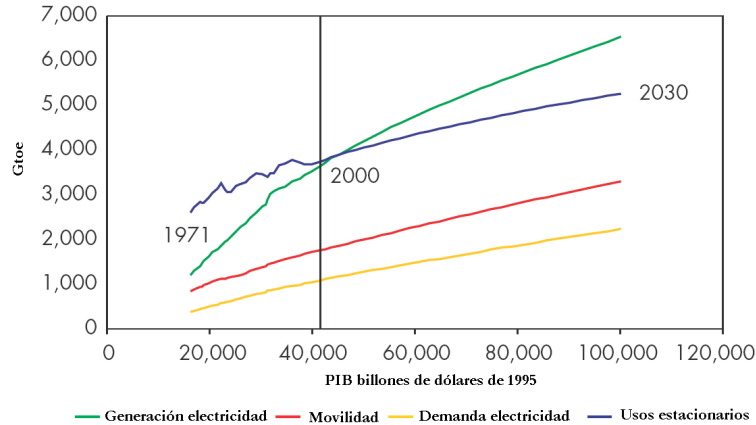


Figura 4.3: Relación entre el producto bruto global y los diferentes usos finales de la energía. Datos en Gigatoneladas equivalentes de petróleo (1 GTOE = 11,63 PWh=41,868 EJ). Adaptada de IEA [2004].

principales de este panorama de riesgo. Los países desarrollados, junto con China e India, los principales importadores de petróleo y gas, serán cada vez más dependientes de exportadores distantes e inestables políticamente. La flexibilidad de la oferta y la demanda de estos combustibles disminuirá cada vez más. El uso se concentrará más en el transporte. El suministro dependerá principalmente de los países con grandes reservas, en el Medio Este y Rusia. La expansión del comercio aumentará la intercoexión entre los países, pero también el riesgo de bloqueos en los pozos, los oleoductos, o el paso de los grandes buques. Además de la estabilidad política de los miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), Rusia jugará un papel importante en el futuro energético, como fuente de crudo y gas. Aunque hay incertidumbre sobre su capacidad para incrementar la producción de petróleo.

Si las políticas gubernamentales no cambian, la emisión de gases invernadero seguirá creciendo incluso a tasas mayores que la demanda por energía. Para el 2030 se estima que la emisión anual será 60% mayor que la actual. El contenido promedio de carbón en la energía, que viene decreciendo marcadamente desde 1970, se mantendrá a los niveles actuales o sólo disminuirá ligeramente en las tres próximas décadas. La mayoría de las nuevas emisiones vendrán de los países en desarrollo, que seguirán usando el combustible más contaminante, carbón. Bajo un escenario muy optimista de gran compromiso de los gobiernos con la reducción de emisiones de CO₂ y mediante importantes desarrollos tecnológicos es posible que se cumplan las metas del Protocolo de Kyoto, aunque los países desarrollados no cumplirían individualmente. Estos esfuerzo sin

Tabla 4.1: Demanda mundial histórica y proyectada de energía primaria en (MTOE) para el escenario de referencia [IEA, 2004]. No incluye leña. Tasa en porcentaje.

	1971	2000	2010	2030	Tasa anual
Carbón	1 449	2 355	2 702	3 606	1,4
Petróleo	2 450	3 604	4 272	5 769	1,6
Gas	895	2 085	2 794	4 203	2,4
Nuclear	29	674	753	703	0,1
Hidro	104	228	274	366	1,6
Renovables	73	233	336	618	3,3
Total	4 999	9 179	11 132	15 267	1,7

embargo les significaría mayor independencia energética.

Pasar de reservas a suministros reales requiere inversiones considerables. En algunos casos la financiación será difícil de lograr. De manera acumulada en los próximos 30 años se requieren inversiones de unos US\$16 billones (16×10^{12}), lo que equivale a US\$568 mil millones por año. La mayoría de esta inversión en el sector eléctrico y en los países en desarrollo. Los desafíos allí son mayores, por el tamaño relativo de las inversiones requeridas en comparación con el tamaño actual de las economías, y porque los riesgos de todo tipo son mayores. El sistema financiero mundial tiene capacidad para abastecer tal necesidad, pero sólo lo hará bajo sus condiciones. La reducción de la pobreza energética es urgente. En el período en consideración habrá avances importantes en algunos países en desarrollo. Pero incluso para los más avanzados energéticamente, el uso de recursos modernos y el consumo per capita permanecerán muy por debajo de los estándares de los países desarrollados. El progreso en acceso a la electricidad será limitado e incluso aumentará el número de personas que dependen de combustibles tradicionales e ineficientes. El desarrollo requiere de acceso adecuado a los recursos energéticos.

Los principales motores del crecimiento de la demanda por energía son el desarrollo económico y el crecimiento de la población. En el pasado, por cada punto de crecimiento de la economía mundial, la demanda de energía ha crecido 0,64%. Esto explica en buena medida el crecimiento de la demanda y se espera que se mantenga en los próximos años. El crecimiento económico promedio se estima en 2,8% anual para los próximos 30 años, es decir la economía se multiplica por 2,29 en este período. La población continuará creciendo a tasas anuales inicialmente del 1,4% para bajar hasta tasas eventualmente menores al 1%. Se pasa de 6 100 millones en el año 2000 a una población del orden de 8 000 en el 2030. El mayor crecimiento se dará en las ciudades de los países en desarrollo.

Tabla 4.2: Consumo final mundial de energía en (MTOE) para diferentes componentes de la demanda total. Tasas en porcentaje. Datos históricos y proyectados según escenario de referencia de IEA [2004]

	1971	2000	2010	2030	Tasa anual
Carbón	630	554	592	664	0,6
Petróleo	1 890	2 943	3 545	4 956	1,8
Gas	604	1 112	1 333	1 709	1,6
Electricidad	377	1 088	1 419	2 235	2,4
Calor	68	247	260	285	0,5
Renovables	66	86	106	150	1,8
Total	3 634	6 032	7 254	10 080	1,7

El panorama de los precios es otro ingrediente importante para la proyección de la demanda futura. Los analistas todavía pronostican precios estables del petróleo (cerca a 25 dólares) para los próximos 30 años, a pesar de varios meses al rededor de \$60 en el 2005. Estos precios recientes se atribuyen al fuerte crecimiento económico de los últimos años, a restricciones de capacidad y a incertidumbres de suministro. La figura 4.1 muestra las variaciones entre enero de 2005 y 2006.

Para mantener un mercado estable se requieren inversiones importantes. Por ejemplo, la demanda por productos livianos de refinería sigue creciendo, mientras que la calidad promedio de los crudos sigue bajando. Para un escenario con precios altos (\$35), la demanda por crudo baja en un 15 %, también baja la participación del cartel de los países exportadores (OPEP), aumenta la participación del gas, disminuyen las emisiones y aumenta la participación de las fuentes renovables.

Además, hay elementos estructurales a tener en cuenta para el pronóstico del crecimiento de la demanda de energía. Por ejemplo, la tendencia reciente es hacia un mayor crecimiento del sector servicios, lo que significa un menor consumo relativo en comparación con la industria, y por tanto un mayor peso de la electricidad. También hace parte de los elementos estructurales la infraestructura tecnológica, algunos de cuyos elementos tienen una duración más prolongada.

En la Figura 4.2 se muestra la tendencia del crecimiento de la demanda global de energía para las distintas fuentes según proyecciones del escenario de referencia. El escenario de referencia incluye las proyecciones económicas y demográficas señaladas y extrapola las tendencias en política energética de los gobiernos y en desarrollo tecnológico. Para el 2030 se pronostica un consumo

aproximado de petróleo de 5,8 GTOE (67 PWh), con una participación todavía mayoritaria aunque decreciente. El gas tiene un crecimiento importante, el carbón decrece bastante su participación. El crecimiento pronosticado para el total es a una tasa del 1,7 % anual, que es ligeramente inferior a la de las últimas décadas, y se llegaría a un consumo total de unos 15 GTOE en el 2030. La Tabla 4.1 contiene los detalles numéricos y las tasas de crecimiento. Puede verse que las fuentes renovables crecen al 3,3 % anual en este escenario de referencia, más rápido que el gas. Para los escenarios con precios altos del petróleo, o con mayor gestión de los gobiernos, las fuentes renovables crecen más rápido que en el escenario de referencia.

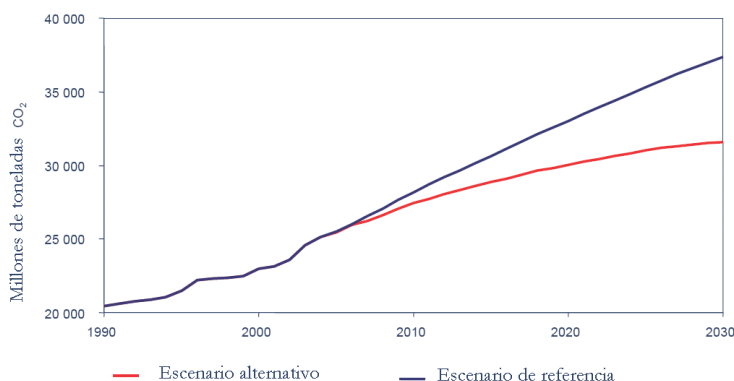


Figura 4.4: Serie histórica y proyectada de la emisión anual de CO₂ a la atmósfera como resultado de la quema de combustibles fósiles para el escenario de referencia y el escenario alternativo. Datos en millones de toneladas de CO₂, 10 000 millones de toneladas de CO₂ equivalen a 3,67 Pg de carbono. Adaptada de IEA [2004].

Para entender mejor el comportamiento futuro de la demanda de energía es importante identificar los usos finales. Los principales son la movilidad (transporte de personas y mercancías), la electricidad (en residencias, industria, servicios), los usos estacionarios (combustible fósil para generar calor en residencias, oficinas o industria) y como insumo para la generación de electricidad (consumo intermedio). Estos consumos crecen con el producto bruto de la economía. Los cambios en las tendencias en esta relación pueden reflejar transformaciones tecnológicas o sustituciones de combustibles. En la Figura 4.3 se presenta las tendencias históricas y proyectadas de esta relación entre demanda y producto bruto de la economía. La movilidad y la electricidad crecerán rápidamente con el crecimiento económico, pero a una tasa ligeramente inferior que en los últimos 30 años. A medida que la eficiencia en la generación de electricidad aumenta, la pendiente de la gráfica disminuye gradualmente.

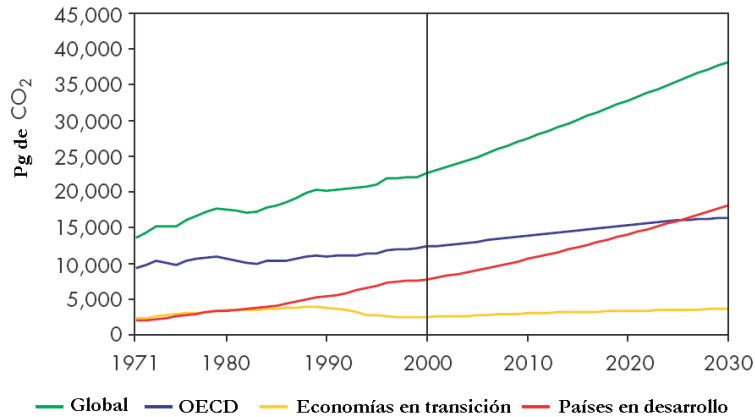


Figura 4.5: Serie histórica y proyectada de la emisión anual de CO₂ a la atmósfera como resultado de la quema de combustibles fósiles para el escenario de referencia por regiones. Datos en Pg de CO₂, 10 Pg de CO₂ equivalen a 3,67 Pg de carbono. La organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD) comprende la mayoría de los países desarrollados, las economías en transición son los países antes socialistas. Adaptada de IEA [2004].

Los usos estacionarios tienen una tendencia todavía menor, después de algunas fluctuaciones, debido a la desaceleración del crecimiento industrial antes del año 2000. La Tabla 4.2 presenta las cifras agregadas por componentes de la demanda final, es decir sin tener en cuenta usos intermedios. La tasa global de crecimiento del consumo final de energía proyectada es del 1,7% anual para los próximos 30 años.

El crecimiento de la electricidad es muy notorio, a tasas mayores que el crecimiento demográfico. Especialmente en los países en desarrollo la electricidad incrementa el número de personas con acceso y también en el consumo per cápita (pasa de 1000 a 2000 kWh por persona al año) para un crecimiento promedio del 4,1% anual, muy superior al promedio global del 2,4%.

A partir de las proyecciones del crecimiento de la demanda de energía es posible calcular las emisiones de CO₂ a la atmósfera resultantes. La Figura 4.4 presenta la serie de tiempo con el total global de emisiones de CO₂ como resultado de la quema de combustibles fósiles, según el escenarios de referencia y el alternativo. Para el escenario de referencia en el año 2030 se predice una emisión anual de 10,2Pg de carbono, mientras que para el escenario alternativo la predicción es 8,7Pg. Los resultados son preocupantes, incluso este último valor es 38% mayor que el promedio de la última década (ver Tabla 3.1). Estos estimativos no incluyen la leña o quema de otros bio-combustibles. En la Figura 4.5 se

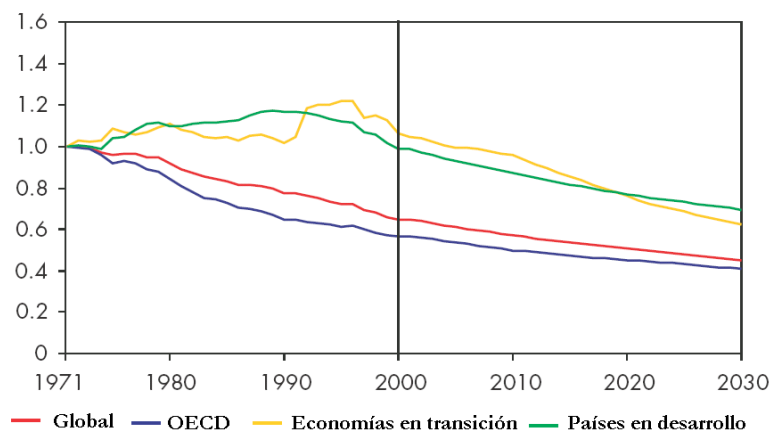


Figura 4.6: Serie histórica y proyectada de la intensidad de CO₂ de la economía, definida como la relación entre la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera y el producto interno bruto. Adaptada de IEA [2004].

presentan los datos por regiones para el escenario de referencia. Se aprecia el crecimiento en los países en desarrollo que pasan de una participación del 34 % en el año 2000 al 47 % en el 2030. China representa el mayor crecimiento, con un total de 3,6 Pg de CO₂ en los próximos 30 años. Mientras que los países de la OECD pasan del 55 % de las emisiones a 43 %. China sola crece casi tanto como la OECD. Para el 2030 la quema de petróleo contribuye con el 37 % de las emisiones, el carbón con el 32 % y el gas con el 25 %. En las últimas tres décadas la demanda de energía creció más rápido (al 2,1 % anual) que las emisiones (1,8 %).

En el escenario de referencia se estima que las emisiones siguen creciendo a una tasa casi igual para las próximas tres décadas y ligeramente superior a la del crecimiento de la demanda de energía. La razón de esto se encuentra en que la energía nuclear e hidroeléctrica permanecen relativamente estancadas y disminuyen su participación en la canasta de energéticos.

Debido a las mejoras en la eficiencia, a la sustitución de combustibles y a cambios en el peso de los diferentes sectores, la economía viene disminuyendo la intensidad de CO₂, como se aprecia en la Figura 4.6. Es decir, para el mismo producto bruto se requiere menor emisión. Para el total, el valor en el 2000 es el 66 % del de 1970, y se proyecta que en el 2030 se llegará al 44 % del valor de 1970. Es decir, se proyecta que la intensidad decrece a una tasa del 1,2 % anual. A pesar de esta ganancia tan grande, las mejoras en eficiencia no son suficientes para compensar el crecimiento económico proyectado (2,8 %).

Tabla 4.3: Crecimiento global de las emisiones de CO₂ para los principales sectores económicos y para varias regiones. Datos para los períodos indicados de acuerdo a observaciones y a proyecciones según el escenario de referencia. Valores en millones de toneladas. Adaptada de IEA [2004].

	OECD		ETR		En Desarrollo		Global	
	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000
	-2010	-2030	-2010	-2030	-2010	-2030	-2010	-2030
ELEC	1 373	1 800	44	341	2 870	5 360	4 287	7 500
IND	11	211	-309	341	739	1 298	440	1 850
TRANS	1 175	1 655	-52	242	1 040	2 313	2 163	4 210
Otros	244	363	-428	234	620	1 365	436	1 962
Total	2 803	4 028	-746	1 158	5 268	10 336	7 325	15 522

OECD: Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, comprende la mayoría de los países desarrollados. ETR: Economías en transición, es decir los países antes socialistas. ELEC: Generación de electricidad. IND: Industria. TRANS: Transporte. Otros: Agricultura, comercio, residencial y servicios.

En consecuencia, para el escenario de referencia, las emisiones crecen en las tres próximas décadas el 62 %, tal y como se había indicado arriba. Mejorar en eficiencia a una tasa mayor que la del crecimiento económico es el verdadero desafío. En China por ejemplo la intensidad de CO₂ decreció el 7 % anual entre 1997 y el 2000, principalmente como consecuencia de un crecimiento económico espectacular y de la disminución de la participación del carbón en la canasta energética.

Las tasas de emisión de CO₂ per cápita se espera que sigan creciendo durante las próximas tres décadas a una tasa del 0,7 % anual hasta llegar a un promedio de 4,7 toneladas por persona al año, cuando en el 2000 era de 3,8. Las diferencias regionales son muy grandes y seguirán a pesar de cambios considerables. China por ejemplo pasa de 2,4 a 4,5, India de 0,9 a 1,6, en África de 0,9 a 1,3. Los países de la OECD y las economías en transición se mantienen en valores mucho más altos de 13 y 11 ton de CO₂ por persona al año respectivamente. Estas cifras reflejan la diferencia entre la tasa de crecimiento demográfico y la tasa de crecimiento de las emisiones. Las ciudades concentran buena parte del crecimiento, por lo tanto las medidas tendientes a mejorar la eficiencia del transporte público pueden tener un impacto significativo.

Por sectores, la generación de electricidad contribuye con casi la mitad del incremento en las emisiones, el transporte con un cuarto y el resto se distribuye entre la agricultura, el sector servicios y el residencial. La Tabla 4.3 contiene estos datos por sectores. Estas cifras son importantes porque muestran que

Tabla 4.4: Indicadores económicos y energéticos básicos para China, incluye comparativo con datos del mundo y tasas anuales de crecimiento promedio en la década 1990-2000.

	China	Mundo	China	Mundo
	2000	2000	Tasa %	Tasa %
PIB (billones de dólares)	4,861	41,609	9,9	3,0
PIB per cápita (dólares)	3 823	6 908	8,7	1,6
Población (millones)	1 300	6 000	1,1	1,4
Demanda energía (GTOE)	0,950	9,179	3,4	1,5
Demanda energía/PIB	0,2	0,2	-5,9	-1,5
Energía (GTOE) per cápita	0,7	1,5	2,3	0,1
Emisiones CO₂ (Pg)	3,052	22,639	2,9	1,2
Emisiones (Pg) per cápita	2,4	3,8	1,8	-0,2

PIB: Producto interno bruto en dólares de 1995 calculados por el método de poder de compra equivalente. Adaptada de IEA [2004]

hay mucho campo para mejorar en la generación de electricidad, donde existen tecnologías limpias disponibles con costos que empiezan a hacerlas factibles. Incluso, tecnologías probadas y en uso en los países desarrollados apenas empiezan a aplicarse a las economías en transición y a los países en desarrollo. Por kWh generado, la emisión para estos tres grupos de países se estima en 500, 850 y 700 g de CO₂ respectivamente y se espera lleguen en el 2030 a 440 para los miembros de la OECD y a 600 g de CO₂ por kWh generado para el resto. Las emisiones por el transporte se estima que crecerán un 85 % en las tres próximas décadas, fundamentalmente en los países en desarrollo, con China y la India como actores principales. En estos países el número de automóviles por cada 1000 habitantes es 12 y 9 respectivamente, mientras que en Estados Unidos es 700. Todo indica que el modelo de desarrollo escogido seguirá el sendero señalado por los americanos, lo que traerá los incrementos de las proyecciones. Para ilustrar la importancia de China en el futuro inmediato se presentan en la Tabla 4.4 sus principales indicadores.

La Tabla 4.5 compara las metas de emisiones de CO₂ del Protocolo de Kyoto con las proyecciones de la IEA [2004] para el 2010. A pesar de que las metas para Rusia y Los países de Europa del Este se cumplen holgadamente, lo que dará pie a negociaciones de derechos, el total no se cumple en un porcentaje cercano al 15 %. El protocolo incluye metas adicionales por emisión de otros gases y por cambios de uso del suelo que no se incluyen en el anterior análisis. Los estudios sobre energía cubren muchos campos, en este corto diagnóstico nos hemos apoyado fundamentalmente en IEA [2004] y sólo se ha mirado lo

Tabla 4.5: Comparación entre las metas del Protocolo de Kyoto y las proyecciones. Datos en Pg de CO₂ por año.

	Metas 2010	Proyección 2010	Cumplimiento %	Cumplimiento Pg
OECD(B)	9,662	12,457	28,9	2,795
Rusia	2,212	1,829	-17,3	-0,383
UEE	1,188	0,711	-40,2	-0,477
Total	13,062	14,997	14,8	1,935

OECD(B): Países de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, signatarios del anexo B del Protocolo de Kyoto, comprende la mayoría de los países desarrollados excepto Corea, México y Turquía que no están en el anexo, y Estados Unidos y Australia que no ratificaron el tratado. UEE: Ucrania y Europa del Este. Las proyecciones son de IEA [2004], incluye sólo las metas por quema de combustibles fósiles

que tiene implicaciones más directas con el problema de la emisión de gases invernadero. Otros aspectos tanto o más importantes no han sido reseñados: la economía de la energía, los mercados energéticos, la geopolítica, la incertidumbre y los aspectos técnicos, por ejemplo.

4.2. Alternativas

Estas tendencias reportadas en el diagnóstico no son inalterables. Mediante una vigorosa intervención gubernamental se puede conducir el mundo hacia una senda energética diferente. Los consumidores también tenemos la palabra. La investigación y el desarrollo tecnológico pueden hacer la diferencia. Las medidas de mejora de eficiencia energética y de intensificación del desarrollo de aprovechamientos limpios pueden llevar a escenarios con menor crecimiento de la demanda por combustibles fósiles y por tanto menor emisión de gases invernadero, sin sacrificios en el desarrollo económico. En este caso se disminuye también la dependencia energética de los países importadores y se mejora el acceso en los países en desarrollo. Esto implica desarrollos tecnológicos que cambian radicalmente la manera como se produce y usa la energía.

Actualmente las fuentes renovables son el segundo contribuyente más grande a la producción global de electricidad. En el año 2000 son el 19 % de la generación de electricidad, después de carbón (39 %), pero adelante de la energía nuclear (17 %), el gas natural (17 %) y el petróleo (8 %). La mayor parte de la electricidad generada de fuentes renovables viene de plantas hídricas (92 %) seguida por combustibles renovables y quema de desperdicios (5 %) y nuevas fuentes renovables (3 %) incluyendo energía geotérmica, solar, eólica, mareas

y otras. A pesar de su pequeña contribución a la producción global de electricidad, las nuevas fuentes renovables progresaron notablemente durante las décadas pasadas, a un promedio de 9,3 % al año durante el período 1971-2000. Estas tasas reflejan durante este período un crecimiento del 1,6 % en hidroelectricidad, 52 % anual en la energía eólica, 32,5 % en la energía solar y 8,8 % en la geotérmica. Sin embargo, las nuevas fuentes renovables no han entrado completamente en la corriente principal del sector eléctrico, pues el crecimiento partió de una base muy baja. La extrapolación de la tendencia tecnológica para cubrir el crecimiento proyectado de la demanda lleva a la canasta representada en la Figura 4.7. El gas y el carbón tienen una participación mayoritaria para esta expansión, pero las renovables son significativas [IEA, 2003].

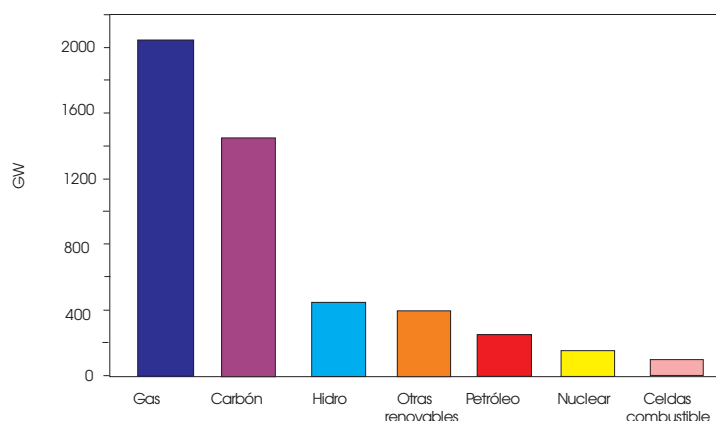


Figura 4.7: Expansión de la capacidad de generación de electricidad para los próximos 30 años. Adaptada de IEA [2004].

Para alcanzar un uso más generalizado de las fuentes renovables se seguirá dependiendo de una política de subsidios gubernamentales y de una vigorosa inversión en investigación y desarrollo, y de mejoras en la gerencia y administración de las empresas de electricidad. Para tal propósito es necesario reconocer que el desarrollo tecnológico y el mercado están íntimamente relacionados y pueden funcionar como un círculo virtuoso, que tiene en cuenta las retroalimentaciones positivas entre la investigación y el desarrollo tecnológico, las mejoras en los procesos de manufactura y el aprendizaje de la experiencia de los mercados que puede ampliarse por los marcos políticos.

El círculo virtuoso viene de un mecanismo de retroalimentación positivo que se puede resumir así: el desarrollo tecnológico lleva a productos menos costosos o de mejor calidad. Esto lleva a que más consumidores se beneficien, las mayores ventas permiten aumentar los volúmenes de producción, lo que a su vez es un nuevo incentivo para “aprender” de la experiencia del mercado, lo que

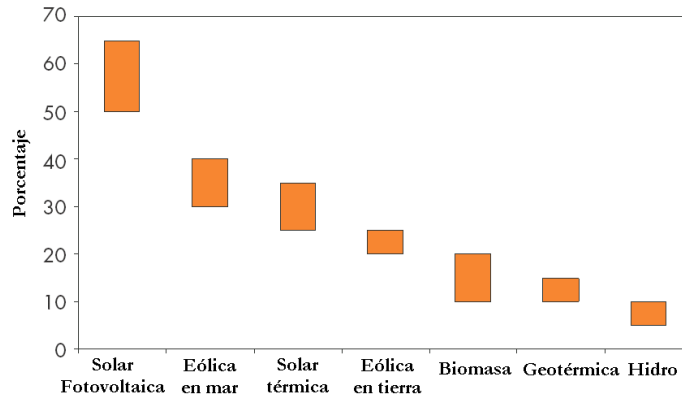


Figura 4.8: Reducción proyectada en los costos de equipos para aprovechamiento de fuentes renovables de energía. Adaptada de IEA [2004].

lleva a nuevos desarrollos tecnológicos. Una política efectiva de incentivo debe reconocer estos mecanismos y reforzarlos, sin perder la visión integral, es decir, con acciones sobre la tecnología y el mercado.

Se ha observado que el costo de manufactura de los productos decrece en un porcentaje más o menos constante a medida que el volumen acumulado de producción se duplica. La observación de que el porcentaje es independiente de la escala de la operación llevó a los economistas a acuñar el término “curva de aprendizaje” cuando se referían al ahorro en el tiempo por mejora en la destreza de los operadores, pero el concepto se ha generalizado e incluye el aprendizaje tecnológico, administrativo, de mercadeo. Algunos distinguen y llaman a esta última curva de experiencia en lugar de curva de aprendizaje. La manera gráfica de expresar este hallazgo empírico es mediante la representación del costo unitario en el eje vertical contra el volumen de producción acumulado. Matemáticamente esto resulta en una ley de potencias entre las dos variables que se caracteriza por el exponente. Los economistas usan la denominación curva del 80% (o cualquier porcentaje p) para el caso en el cual el costo unitario se reduce en el 20% ($100 - p$). Conocer el parámetro que identifica una curva de aprendizaje es importante para predecir el desarrollo de un producto. Las razones para la reducción de precios pueden ser variadas, desde la mejora en la destreza de los trabajadores (o de los gerentes), pasando por la estandarización, la especialización, el mejor uso de los equipos, mejor selección o disponibilidad de los insumos, desarrollo de cadenas de suministro y distribución, por cooperación, por competencia, rediseño. Aunque relacionado, la economía de escala refleja fenómenos diferentes, se debe a la posibilidad

de distribuir los costos de inversión entre más unidades del producto. Este efecto es importante sobre todo para los casos en los cuales el capital es alto. En el caso de la energía claramente este efecto es importante, por ejemplo en la penetración de la energía eólica, que ha permitido el abaratamiento de los aerogeneradores. Otro fenómeno relacionado es el de la economía de red, o algunas veces llamada externalidad de red, que es función del número de usuarios, no de la eficiencia misma de la industria. Por ejemplo, el uso de vehículos a hidrógeno o eléctricos requiere la existencia de una red de suministro y a medida que haya más carros está es más factible.

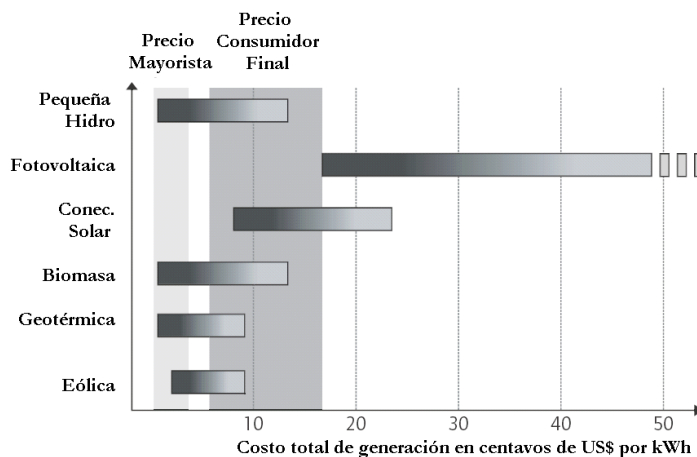


Figura 4.9: Precios de generación de electricidad para diferentes fuentes renovables, comparados con los precios del mercado. Adaptada de IEA [2004].

El más alto potencial para reducción de costos se da en las tecnologías que son más caras y de desarrollo más reciente que tienden a tener una curva de aprendizaje más pendiente, con una tasa de progreso alta, digamos del 80 %, lo que significa que por cada vez que se duplique el volumen manufacturado, el costo se reduce un 20 %. Globalmente las tecnologías solares de las celdas fotovoltaicas podrán reducir costos entre un 30 y un 50 % por década en los próximos 20 años como resultado del efecto combinado de la curva de aprendizaje y del crecimiento del mercado. El potencial de reducción medio se puede identificar en las tecnologías que tienen actualmente un costo medio a bajo e introducción relativamente reciente. Tienden a tener una curva de aprendizaje con tasa de progreso del orden del 90 %, es decir reducen el precio en 10 % ante un doblado del mercado. Globalmente la energía eólica está en esta categoría, y se estima que por efecto de la curva de aprendizaje y del crecimiento del mercado los costos se reduzcan el 25 % por década en los próximos 20 años. La

energía geotérmica también cae en esta categoría, con reducciones estimadas del 10 al 25 % por década para el mismo período. Menor reducción en costos se espera para las tecnologías más maduras, para las cuales la curva de aprendizaje es muy plana y hay poco potencial de crecimiento del mercado. Caen aquí las pequeñas centrales hidroeléctricas y la bio-energía. Para éstas la reducción de costos es apenas del orden del 5 % por década.

En particular la competitividad dependerá de los costos de inversión y operación. El pronóstico para las fuentes renovables es de un crecimiento anual promedio de aproximadamente el 10 % si se mantienen las políticas actuales de incentivos y apoyo a la investigación. Las tecnologías de mayor desarrollo son la solar que crece al 23 % y la eólica al 20 %. La hidroelectricidad y el uso de bio-masa como combustibles crecen vegetativamente a tasas entre el 1 y el 9 %. La mayoría de las fuentes renovables sufren de problemas de intermitencia y confiabilidad (falta de firmeza) en el suministro, lo cual se podrá compensar si los aprovechamientos están conectados a un sistema y si hay otras fuentes complementarias.

Globalmente las pequeñas centrales hidroeléctricas tenían una capacidad instalada de 32 GW en el 2000, y pueden ubicarse en la categoría de la tecnología madura. Lo mismo que la dendroenergía, que tenía en la misma fecha una capacidad instalada de 37 GW. Mientras que la energía geotérmica apenas tenía 8 GW instalados. A pesar de que lleva hasta un siglo de explotación en algunos lugares privilegiados, es novedosa en otros lugares con potencial. La energía eólica ha estado sometida a un intenso desarrollo tecnológico y de mercado en los últimos años, con una capacidad total instalada de 30 GW en el 2002, principalmente en Alemania (12 GW), EUA (4,7 GW), España (4,1 GW), Dinamarca (2,9 GW) e India (1,7 GW). La energía solar instalada es muy baja, con 1,1 GW en el 2000, pero ha triplicado su capacidad en los últimos cuatro años. La energía solar concentrada tuvo in inicio muy auspicioso en 1980, pero no pudo sostener el mercado y ha desaparecido por falta de soporte gubernamental. La Figura 4.9 muestra el estado actual de los precios de las diferentes fuentes y cómo se comparan con los precios mayoristas y al consumidor en el mercado eléctrico.

El convenio de las Naciones Unidas sobre cambio climático contiene un artículo sobre la transferencia de tecnología y la cooperación en todo lo relacionado con la implementación y el desarrollo de medidas que contribuyan al cumplimiento de las metas, en particular en los relacionado con el desarrollo de fuentes renovables. Esto abarca también la formación de recurso humano.

Es importante mirar el balance completo al hacer una valoración global de las fuentes de energía. La tasa neta de energía Q_{NE} que se puede entregar para su uso mediante un procedimiento determinado requiere que a la producción bruta Q_{PR} se le descuenta la energía necesaria para la operación Q_{OP} , y la

energía necesaria para creación del energético E , que se empleará paulatinamente durante la vida útil T , es decir, $Q_{NE} = Q_{PR} - (Q_{OP} + E/T)$. Algunos cálculos muestran que la producción de etanol puede resultar en un balance neto negativo, pero por subsidios puede ser rentable para los productores.

A continuación se hace una introducción muy breve a algunas de las alternativas energéticas en las cuales hay lugar a desarrollo tecnológico. Un tratamiento completo en cada caso requeriría de una evaluación de las características técnicas específicas, de sus costos, una revisión de la industria, de cuáles son los principales jugadores, del mercado, los volúmenes y su evolución espacial y temporal, los asuntos ambientales. Es necesario hacer proyecciones de las oportunidades en reducción de costos, los campos técnicos en los cuales es susceptible desarrollo, los aspectos culturales y sociales.

4.3. Eficiencia en el uso

El mejoramiento de la eficiencia es una opción con la que se gana por todos los lados. La posición contraria a las medidas sobre control de la emisión de gases de invernadero se justifica en que se considera inaceptable frenar el desarrollo económico o incurrir en altos costos de conservación. La mejor manera de promover la descarbonización no es defendiendo sacrificios económicos que se compensarían con beneficios ambientales o con el ahorro de costos futuros asociados al cambio climático. Antes de recurrir a tales argumentos, lo cual parece será necesario también, es necesario promover todas las posibilidades de ahorro de energía y por tanto disminución de costos y aumento de ganancias. Posibilidad que existe para la industria, la agricultura, los servicios y demás actividades productivas. Igualmente, los hogares y consumidores finales tienen la opción de ahorrar costos en energía sin sacrificar el consumo. Es posible que la estrategia de mejora en la eficiencia en el uso de la energía haya que combinarla con sustitución de fuentes, pero es la primera opción y la que menos oposición política o ideológica encuentra. Se va a presentar el caso en el cual la magnitud del posible ahorro es significativa con tecnología disponible. La base para esta sección es Lovins [2005].

Grandes corporaciones han hecho avances significativos en esta dirección. En una sola década, DuPont disminuyó su consumo de energía 7% a pesar de que incrementó su producción 30%, además por mejoras técnicas la emisión de CO₂ bajó el 72%. Tal ahorro se reflejó en un aumento de sus ganancias de 2 mil millones de dólares. Estrategia similar han empleado IBM, BP, GE, British Telecom y Bayer. A mayor escala, si se miran las cifras de los Estados Unidos se ve que en los últimos 30 años la relación entre el consumo de energía y producto interno bruto disminuyó en el 47%, reflejando de manera agregada

mejoras en la eficiencia energética.

El costo de las pérdidas de energía para todo el planeta se estima en un billón de dólares al año. No es una sorpresa entonces que casi cualquier proceso que se mire muestre la inmensa oportunidad que existe de mejoras en la eficiencia. Por ejemplo, la iluminación con bombillas incandescentes tiene una eficiencia total del 3 % si mira la cadena completa desde la generación de electricidad a partir de carbón (la eficiencia es la relación entre la energía aprovechada y la energía invertida). En la central (eficiencia del 30 %), la distribución, y la bombilla hay lugar a mejoras importantes. En los hogares y oficinas por ejemplo, aproximadamente el 2,5 % del consumo proviene de televisores, computadores, y demás equipos electrónicos cuando están apagados, por mal diseño del estado en espera. Aunque la cifra no parece grande, su impacto es inmenso: solamente para Estados Unidos la energía perdida por este concepto representa la producción continua de 12 centrales de 1000 MW, es decir más que toda la electricidad que consume Colombia. Las pérdidas en motores a gasolina son del orden del 75 %, en motores diésel del 55 %, en la transmisión y distribución de electricidad son mundialmente del orden del 10 %, en motores eléctricos las pérdidas son también de ese orden, en la transmisión de movimiento mediante ejes del 2 %, en estaciones de bombeo del 25 %, en redes de tubería del 25 %.

Si es tan amplia la posibilidad de mejoras en la eficiencia, ¿por qué no es aprovechada? Las razones son varias: el ahorro está distribuido en porciones pequeñas que no son visibles, muchos confunden eficiencia con restricción en el consumo, los consumidores no tienen el conocimiento técnico necesario para tomar las decisiones, las costumbres tienen una inercia grande, la señal económica no se aprecia porque llega rezagada con respecto a la decisión, hay costos escondidos al comprar los equipos mediante los cuales se usa la energía (electro-doméstico, gaso-doméstico, vehículo, edificio, maquinaria), los subsidios hacen aparecer barata la energía, hay costos de inversión y no hay financiación. Muchas veces el compromiso con la eficiencia se expresa retóricamente y no se refleja en medidas efectivas. El ejemplo de ahorro en consumo de energía eléctrica en Brasil hace un par de años ante la perspectiva de un racionamiento por restricciones en la oferta demuestra que las posibilidades reales son inmensas.

El transporte consume una proporción importante de la energía total, usa del orden del 70 % del total del petróleo y genera aproximadamente el 40 % de las emisiones de CO₂. Las perspectivas son grises si no hay cambios tecnológicos porque los países emergentes han asumido un modelo de transporte basado en el automóvil particular. Pero el campo de acción para mejorar la eficiencia es inmenso, tanto en los automóviles mismos, como en el sistema de transportes. Después de casi 120 años de haber sido inventado, el carro sigue siendo muy ineficiente. Apenas un 13 % de la energía utilizada llega a las ruedas, el resto se pierde en calor generado en el motor, en ruido, en la transmisión, en espera

Tabla 4.6: Rango indicativo de la vida útil (años) de varios equipos asociados al consumo de energía.

Equipo	De	Hasta
Equipo	Límite inferior	Límite superior
Carros	7	20
Camiones y Buses	10	25
Aviones	20	35
Maquinaria Industrial	10	40
Hornos	15	60
Quemadores	15	40
Neveras	10	15
Artículos Electrónicos	5	10
Equipos Calefacción Agua	10	20
Equipos Calefacción y Aire Acondicionado	10	20
Edificios	40	120

y en aditamentos. De la cantidad que llega a las ruedas, más de la mitad se pierde en calor en la llantas, el aire y la carretera. Sólo un 6 % del total se emplea en acelerar el carro, y luego se pierde en el sistema de frenos. Como la masa del conductor (y pasajeros, si los hay) es una fracción de la masa del carro (aproximadamente 5 % por persona), la energía realmente aprovechada es de sólo el 1 % para un carro que lleva sólo al conductor.

La física indica una estrategia obvia: reducir significativamente el peso del carro, que es responsable por tres cuartos de las pérdidas en las ruedas. Cada punto ahorrado en las ruedas significa una ganancia adicional de siete puntos en la transmisión y motor. El punto débil de los vehículos ultra-livianos, la seguridad, hoy no debería ser problema gracias a los materiales modernos, livianos y altamente resistentes. Las mejoras que resultan abren el camino para los carros eléctricos y a hidrógeno, al disminuir por ejemplo el tamaño de las baterías o de los tanques de almacenamiento.

Hay muchos artículos disponibles en el mercado que permiten mejorar la eficiencia energética. Por ejemplo, las lámparas fluorescentes compactas consumen 75 % menos energía que las incandescentes, duran 10 veces más y el precio ya es comparable. Los controles electrónicos para motores. Los sensores para iluminar sólo los espacios utilizados. La vida útil de los equipos es un dato importante para las decisiones (ver Tabla 4.6).

La substitución de energéticos es una posibilidad, algunas veces requiere in-

versión en transformación de los equipos que se paga en el largo plazo. En esta categoría es importante resaltar la posibilidad del gas natural vehicular.

La arquitectura bio-climática significa enormes posibilidades para uso eficiente de la energía. Esto incluye entre otras cosas ventanas bien diseñadas para una buena iluminación natural, adecuado asoleamiento, control de radiación infrarroja; buena ventilación natural; calefacción solar de agua.

Los gobiernos (local, regional, nacional y global) tienen en sus manos muchas herramientas: códigos de construcción, reglamentación para que la información sobre eficiencia energética de los vehículos, aparatos domésticos e industriales sea obligatoria, financiación adecuada para compra de equipos que signifiquen consumo eficiente, campañas educativas, promoción de asesoría energética a la industria, el comercio y a los consumidores residenciales. La racionalización del transporte urbano tiene consecuencias energéticas importantes. Las mejoras en las comunicaciones, la posibilidad de trabajo a distancia, la mejora en trámites que significan ahorro de desplazamientos, todos son excelentes posibilidades que además tienen adicionalmente otros beneficios. Además los gobiernos tienen la responsabilidad de que el círculo virtuoso de la innovación tecnológica funcione, mediante adecuado control del mercado y los incentivos a la innovación y desarrollo tecnológico. Algunas de las políticas energéticas tienen impactos de largo plazo e influyen en múltiples sectores. Para tal fin, los gobiernos tienen la responsabilidad de hacer adecuada planeación y seguimiento. Un ejemplo elemental de reglamentación necesaria se refiere a la posibilidad de y a las condiciones económicas y prácticas para que los generadores pequeños con fuentes renovables puedan comprar faltantes y vender excedentes a la red.

La política de precios se tratará más adelante (Sección 7.6), a mayor profundidad. En general debe llevar la señal adecuada sobre la eficiencia energética, los subsidios conducen a uso ineficiente. Cabe incluso la posibilidad de rebajas (subsidios) por eficiencia e impuestos adicionales por ineficiencia.

4.4. Fuentes renovables

4.4.1. Hidroelectricidad

Las centrales hidroeléctricas son una manera indirecta de aprovechar la energía solar. Se toma agua que posee energía potencial o cinética y mediante un sistema de turbinas y generadores se produce electricidad. La evaporación y la lluvia llevan el agua a los sitios de captación mediante el ciclo hidrológico natural. La potencia generada por una central se calcula de acuerdo a $P = \eta\gamma qh$, donde η es la eficiencia, γ el peso específico del agua, q el caudal, y h la caída neta entre la captación y la turbina. En términos prácticos, las centrales

se pueden clasificar de acuerdo al tamaño, a la caída (alta, media y baja) y al tipo de turbina.

La terminología para clasificar las centrales hidroeléctricas de acuerdo al tamaño no es universal, denominaremos pequeñas hidroeléctricas a aquellas menores de 10 MW; mini-centrales a aquellas entre 100 kW y 1 MW; y micro-centrales por debajo de 100 kW.

En las turbinas a reacción la presión del agua sobre las aspas se convierte en energía cinética mediante empuje hidrodinámico. Entre las más comunes están las Francis y las Kaplan. Las Francis se utilizan para caídas entre 5 y 250 m y pueden tener eje horizontal o vertical. Las Kaplan son de flujo axial para baja caída. En las turbinas de impulso el agua golpea los alabes colocados en la periferia del volante mediante chorros a alta velocidad. El tipo más común es la Pelton, que se usa para caídas de 50 hasta centenas de metros. Además de ésta que es la más clásica, hay otras que pueden resultar económicas y flexibles. La eficiencia de la central depende fundamentalmente de la eficiencia de la turbina. Los generadores son muy eficientes, los hay sincrónicos (más eficientes) y asincrónicos (más económicos). Las centrales hidroeléctricas incluyen además de los equipos, las obras civiles de captación, eventualmente presa, conducción, casa de máquinas, en algunos casos protección hidráulica de la central y la conducción mediante almenaras y línea de transmisión. El diseño, la supervisión durante construcción y el mantenimiento deben ser tenidos en cuenta en un proyecto de esta naturaleza. Además, es necesario un estudio de impacto ambiental. El impacto negativo más grande se asocia a la construcción de presas, por la inundación de terrenos, la interrupción del flujo natural del agua, y los transvases. El aspecto ambiental es el factor más crítico para la factibilidad de este tipo de obras.

Existen regiones del mundo, en particular en América Latina y en Colombia, con grandes potenciales no explotados. ISA [1980] estima para Colombia el potencial hidroeléctrico identificado en 240 GW para proyectos mayores de 100 MW. Para proyectos menores de ese límite se puede tener un potencial semejante, siendo por tanto el potencial total estimado del orden de 500 GW. Esto compara con la capacidad instalada actual de 13,4 GW (64 % hídrica) que atendió una demanda bruta anual de 47000 GWh en el 2003 (factor de utilización de la capacidad instalada de 0,44, las cifras de demanda anual y capacidad instalada para Estados Unidos son 80 veces mayores). Es decir se aprovecha menos del 5 % del potencial identificado. Los costos de generación promedios en Colombia están actualmente cerca de 30 milésimos de dólar por KWh, mientras que los costos para una pequeña central están en el rango de 30 a 60 (para referencia, a comienzos de 2006, el costo final al consumidor residencial es 200 pesos, es decir 95 milésimos de dólar por KWh e incluye los costos de transmisión, distribución y facturación). Las pequeñas centrales pueden ser

atractivas en los sitios mejores, es decir costos totales competitivos. También en los sitios con demanda local suficiente y altos costos de interconexión con la red. Las micro y minicentrales son una alternativa para los municipios y corregimientos apartados y la agroindustria.

Además de la alta componente hídrica incorporada al sistema interconectado, en épocas anteriores Colombia tenía muchas centrales, desde pequeñas hasta micro que abastecían municipios, veredas y fincas. Algunas de ellas están abandonadas, la mayoría de las veces por inadecuado mantenimiento, resultado de debilidad institucional. La repotenciación y recuperación de estas obras es una alternativa atractiva.

4.4.2. Energía solar

Las celdas fotovoltaicas convierten radiación solar incidente directamente a electricidad con una eficiencia entre el 10 y el 20 %. Su costo de producción ha bajado bastante; en 1972 la celda fotovoltaica usada en los vuelos espaciales necesitaba 20 años de funcionamiento para pagarse, hoy sólo 3. A pesar de que está en su estado inicial de desarrollo, ya es competitiva para sitios aislados de la red y para usos específicos como en las telecomunicaciones. Los precios actuales significan unos 20 centavos de dólar por kWh.

Un sistema de energía solar consiste de un panel de varias celdas interconectadas, un sistema de baterías y un inversor para pasar a corriente alterna. La interconexión a la red sirve para regular la variabilidad natural y para suministro nocturno y puede eventualmente eliminar la batería. La producción en masa de celdas puede disminuir significativamente los costos con respecto a los actuales. En Japón hay producción en serie de celdas integradas a las tejas.

4.4.3. Energía eólica

La energía eólica es una de las de mayor crecimiento en los últimos años y potencial futuro. La tasa de crecimiento se espera sea del orden del 10 % anual para llegar a 539 TWh en el 2030. La mayoría en los países avanzados. El costo todavía es alto en comparación con las centrales a gas, pero el desarrollo tecnológico y la masificación traen con seguridad una baja en los costos.

La potencia que se puede obtener de un molino de viento se puede calcular a partir de la energía cinética del aire que atraviesa perpendicularmente la superficie barrida por las aspas por unidad de tiempo y es igual a $P = \frac{1}{2}\eta\rho gAv^3$, donde ρ es la densidad del aire, g es la aceleración de la gravedad, η es la eficiencia, A el área barrida por las aspas normal a la dirección del viento, y v la velocidad. La potencia y en consecuencia la energía dependen pues del cubo de la velocidad. Un factor crítico para un aprovechamiento es por lo tanto La

variabilidad temporal de la velocidad, función del clima, de la época del año, de la hora del día y de la intermitencia. Normalmente se describe mediante una distribución de probabilidades. Los mejores sitios se caracterizan por velocidad sostenida del orden de 10 m/s.

Actualmente se aprovecha la energía eólica mediante la generación de electricidad con aerogeneradores. Sus componentes principales son: las palas del rotor o aspas que capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje, las cuales pueden medir hasta 35 m, su diseño es semejante al de una hélice de avión o de barco, e involucran en su diseño teoría avanzada de turbulencia y materiales compuestos; buje del rotor, acoplado al eje de baja velocidad que conecta al multiplicador; en los aerogeneradores modernos, el rotor gira lentamente, a unas 25 revoluciones por minuto; el multiplicador o caja de velocidades recibe el eje de baja velocidad y entrega a un eje de alta velocidad que gira hasta 50 veces más rápido; el generador eléctrico, normalmente asíncrono o de inducción, con potencia entre 500 y 2200 kW. La altura de un molino actual puede ser hasta 80 m. Los costos de instalación se encuentran entre 800 a 1200 US\$/kw, para un costo total de generación 30 a 50 milésimas de dolar americano por kwh. Hay alta competencia entre los fabricantes de los aerogeneradores y un ritmo de innovación importante que ha llevado a mejores eficiencias y menores costos. El crecimiento del mercado también redundan en economías de escala importantes. En Europa la potencia instalada supera los 15 GW, en el mundo los 20 GW.

En Colombia el potencial eólico se encuentra en un estado de desarrollo incipiente. Hay esfuerzos por cuantificar el recurso, y en la Alta Guajira hay una reserva energética prometedora que ya empezó a ser explotada por el proyecto Jepirachi por las Empresas Públicas de Medellín, donde las velocidades del viento son en promedio del orden de 9 m/s.

4.4.4. Bio-combustibles

El uso de bio-combustibles es inmemorial, siempre se ha citado el descubrimiento del fuego como uno de los hitos del progreso de la humanidad. Nuevamente, esta fuente corresponde a un uso indirecto de la energía solar a través de la fotosíntesis. La eficiencia energética de la fotosíntesis es baja, del orden del 5 %, menor que la de las celdas solares. Sin embargo existe inmenso potencial energético para el uso de bio-combustibles. Las alternativas van desde la leña tradicional, el alcohol carburante (etanol), el bio-diésel, el metanol y la dendroenergía. Para la evaluación energética es necesario incluir de manera integral la energía utilizada en la producción, por ejemplo para la fabricación de los fertilizantes. La eficiencia tanto de la agricultura como de la producción de los combustibles ha progresado. La conclusión de este tipo de análisis para

el caso del etanol a partir de maíz es que un galón tiene 34 % más energía que la utilizada (por el hombre) para su producción [Shapouri et al., 2002]. Para el caso del bio-diésel, según <http://biodiesel.co.uk> el balance es 78 %. La dendroenergía aprovecha normalmente material sobrante por lo que no se dispone de este tipo de análisis, sin embargo si se propone la siembra y recolección de material vegetal para su utilización directa como energéticos será necesario hacer una valoración completa. Desde el punto de vista de la emisión de gases invernadero, el balance es neutro porque se está emitiendo CO₂ capturado por las plantas. No así para el caso de la leña, que puede estar emitiendo carbono capturado decenas de años atrás. El uso de la leña además tiene otras consecuencias negativas por la deforestación sobre lo cual se hablará en la Sección 6.4. Además del análisis energético y del balance de carbono es necesario el análisis económico, de seguridad, práctico y técnico de cada alternativa.

La dendroenergía a partir de material vegetal de desecho es una alternativa energética atractiva. Hay experiencia general en la utilización ligada a la agroindustria por ejemplo del papel, de la caña de azúcar o de desechos urbanos. En Finlandia la producción de energía eléctrica a partir de bio-masa representa cerca del 18 % del total. Los precios son competitivos, del orden de 3 centavos de dólar por kWh. El Departamento de Agricultura estima que para los Estados Unidos anualmente puede haber disponibles cerca de 190 millones de toneladas de material vegetal con un potencial energético aproximado de 0,8 PWh, es decir cerca al 20 % del consumo anual de electricidad de los Estados Unidos. El aprovechamiento de tal potencial dependerá de muchos otros factores. En particular es importante la cogeneración, es decir la generación en plantas pequeñas que aprovechan el calor y generan electricidad que se consume localmente y vende los excedentes a la red.

El etanol puede usarse como combustible, sólo o mezclado con gasolina, en los motores de explosión tradicionales con muy poca o ninguna modificación. Se produce mediante fermentación de azúcar con levaduras (en particular *saccharomyces cerevisiae*). Un subproducto de esta reacción es CO₂ (2 átomos de carbono por cada 6 en el azúcar). También se puede producir etanol a partir de almidón, que se desdobra primero en azúcar mediante hidrólisis. La concentración máxima de etanol que se logra por fermentación es del orden del 20 % y es necesario la purificación mediante destilación. Así se obtiene una mezcla de 96 % de concentración que no puede separarse más por destilación. Se usan filtros de fibras naturales o aditivos químicos para la etapa final. Últimamente han aparecido procesos de obtención de glucosa a partir de celulosa para la posterior fermentación. También se ha descubierto que una bacteria anaerobia presente en los excrementos de pollo puede producir etanol directamente a partir de hidrógeno y moléculas con un sólo átomo de carbono, como CO o CO₂.

Brasil es el mayor productor de etanol combustible a partir de azúcar de caña con 14 mil millones de litros por año. Estados Unidos produce casi la misma cantidad a partir de maíz. En Brasil se utiliza directamente en carros flexibles, que funcionan con alcohol puro, gasolina o una mezcla. Mediante este esquema han logrado reducir su consumo de gasolina en un 40 %. En Estados Unidos se usa una mezcla de gasolina y etanol al 10 % denominada gasol y los carros no requieren ninguna modificación. En Colombia acaba de entrar en operación un combustible semejante.

El metanol se ha propuesto como un combustible competitivo con la gasolina o el etanol porque puede producirse directamente de CO_2 por un proceso electroquímico o mediante oxidación de metano. El metanol puede ser usado directamente en celdas de combustible, o mezclado con gasolina. Es además seguro. Tiene algunas desventajas: corrosivo para el aluminio, atrae agua, y tiene problemas a temperaturas bajo cero.

Con el nombre de biodiésel se conoce cualquier combustible equivalente al diésel, hecho a partir de aceites vegetales o grasa animal. Realmente hay varias clases, incluyendo esterres, esterres oxigenados y alkenos. Estos combustibles son biodegradables, no-tóxicos, producen bastante menos emisiones que el diésel equivalente de petróleo cuando se queman y funcionan perfectamente en los motores a diésel normales. Puede distribuirse usando la estructura actual, de hecho en varios países se emplea sin ningún inconveniente. Puede usarse mezclado con el diésel tradicional, lo que mejora sus propiedades. Uno de sus efectos es que limpia los motores, por lo que puede traer alguna dificultad en vehículos usados. En vehículos previos a 1992 puede atacar los empaques y mangueras y filtros. A temperaturas muy bajas puede producir geles que obstruyen las líneas de conducción. Otro problema menor es que tiene buena afinidad por el agua. Reduce la emisión de CO a la mitad, de CO_2 al 80 % y de varios otros contaminantes, no contiene azufre por ejemplo. Es más rápido para el encendido.

4.4.5. Hidrógeno

En principio el combustible más limpio posible es el hidrógeno, cuya reacción con oxígeno libera energía explosivamente en motores, o tranquilamente en celdas de combustible y con únicamente vapor de agua como subproducto. El hidrógeno es relativamente abundante y bien distribuido, lo que permitiría una economía basada en la electricidad y el hidrógeno, dependiente sólo de la tecnología y no de acceso político. Sin embargo hay varios problemas tecnológicos, económicos y prácticos que resolver antes de que sea una alternativa real a escala comercial.

El hidrógeno no se encuentra directamente en la naturaleza como H_2 , que es

el combustible, pero se puede obtener de diversas maneras, por ejemplo del agua mediante electrólisis (un proceso que consume energía), de reforma de combustibles fósiles, en cuyo caso no se elimina totalmente la emisión de gases invernadero, pues se transfiere del consumo final a la producción inicial. El H_2 cumple un papel semejante a la electricidad como transportador de energía.

La aplicación de esta tecnología requiere una sistema de producción, red de distribución y un sistema de almacenamiento. En todos estos componente se requiere seguridad, confiabilidad y economía. Para ilustrar el estado actual de desarrollo unas cifras bastan. El costo más bajo de producción de hidrógeno es cuatro veces superior al costo de la gasolina con igual poder energético (a partir de metano). El almacenamiento en tanques presurizados se utiliza hace rato, pero para hacerlo práctico para vehículos requiere aumentar la densidad. Las celdas de combustible existente, aunque funcionales son todavía costosas, 3000 dólares por kW instalado contra 30 para motores a gasolina. La producción en masa puede reducir estos costos en un factor de diez, pero todavía queda un camino por recorrer para la viabilidad comercial.

Entre las alternativas promisorias que se investigan está la producción directa de H_2 a partir disociación de agua por luz solar. La eficiencia de este sistema integrado es mayor que la de un proceso secuencial de generación de electricidad a partir de energía solar para luego separar el agua por electrólisis. Otra alternativa en consideración tiene inspiración en la naturaleza, en el proceso de la fotosíntesis. En ella juega un papel importante la catálisis basada en grupos de manganeso-oxígeno y la utilización de proteínas muy elaboradas. La fotosíntesis tiene la característica de funcionar a temperatura ambiente, mientras que otras alternativas tecnológicas estudiadas son a altas temperaturas.

El almacenamiento es un reto pero también una oportunidad. La electricidad esencialmente no puede almacenarse, lo que tiene implicaciones importantes pues la generación debe hacerse a la misma tasa que el consumo. La variabilidad horaria, diurna o estacional del consumo lleva a la necesidad de sobreinstalación para poder atender los picos de la demanda y por lo tanto a la existencia de capacidad ociosa. Para muchas de las fuentes renovables como la eólica y la hidroeléctrica, este aspecto es crítico. Pues bien, si la tecnología para el almacenamiento del hidrógeno se resuelve satisfactoriamente se tendría un aporte importante para la solución del problema de la intermitencia. Para usos estacionarios el almacenamiento en tanques en estado líquido o a alta presión es de utilización estándar, pero involucra pérdidas energéticas del orden del 40 %. Para el uso en transporte, las limitaciones son mayores. Mientras 1 kg de gasolina tiene una capacidad energética de aproximadamente 37 MJ y ocupa 1,5 L, las cifras correspondientes para el hidrógeno líquido son 9 MJ y 1,2 L y para H_2 comprimido son 3 MJ y 1,5 L. Estas cifras muestran que se requiere el diseño de métodos más eficientes de almacenamiento que además permitan una

rápida extracción a condiciones ambiente. Las alternativas estudiadas incluyen materiales nano-estructurados.

Las celdas de combustible tienen actualmente una eficiencia mucho mayor (66 %) que la de motores de combustión a gasolina (22 %) o diésel (45 %). Como los motores eléctricos tienen alta eficiencia (más del 90 %), se puede convertir energía química del hidrógeno a electricidad y luego a energía mecánica con mayor eficiencia (59 %) que la de los motores de explosión. Pero adicionalmente, los motores de combustión existentes se pueden reconvertir a quemar hidrógeno muy fácilmente y mejoran la eficiencia en un 25 % y sólo emiten agua a la atmósfera. Hay varias experiencias exitosas para aviones y automóviles.

El corazón de las celdas de combustible es una membrana que transmite protones o iones de oxígeno entre electrodos mientras los electrones viajan por el circuito eléctrico externo para realizar el trabajo útil. Por las membranas deben percolar eficientemente tres fases: gaseosa (H_2 u O_2), electrolítica (protones) y metálica. La catálisis que acelere la lenta cinética de la reacción de reducción en el cátodo es crucial para el aumento de la eficiencia. Las membranas actuales son de polímeros ácidos de perfluorosulfónico, su diseño y producción involucra nano-tecnología y especialistas de varias disciplinas.

La seguridad del uso del hidrógeno es un factor importante en su eventual adopción generalizada. Por ser un combustible muy inflamable, volátil y por la alta permeabilidad de la mayoría de los materiales su uso genera nuevos riesgos. Por ejemplo, la hidrodinámica del hidrógeno o de mezclas aire e hidrógeno, el efecto en la combustión de trazas de otros gases, el comportamiento de los materiales en presencia prolongada de hidrógeno, son todos asuntos que requieren estudio y desarrollo tecnológico.

4.4.6. Nuclear

La energía nuclear consiste en el uso controlado de reacciones nucleares para realizar trabajo. Se produce cuando un material fisible, como el uranio 235 se concentra para acelerar la tasa de desintegración natural mediante una reacción en cadena que genera calor, que se usa para producir vapor y se aprovecha en una turbina.

La energía nuclear no es renovable, por ejemplo si toda la energía eléctrica que actualmente se produce con carbón se reemplaza por energía nuclear con la tecnología actual los depósitos sólo duran unos 50 años. Pero hay otros materiales además del uranio, la tecnología puede mejorar la eficiencia y hay depósitos mayores que no se contabilizan en las reservas porque los costos de extracción son muy altos. La energía nuclear es limpia con respecto a la emisión de gases invernadero, pero ha encontrado dos dificultades principales. La seguridad de las centrales que en vista de los accidentes de Chornobyl (1986) y Three Miles

Island (1979) ha producido oposición a la tecnología en la opinión mundial. La segunda dificultad se refiere a la disposición de los desechos radiactivos. Adicionalmente está la preocupación de la proliferación del uso militar de la tecnología.

El potencial de la fisión nuclear es inmenso. La relación entre la cantidad de energía que se puede aprovechar a partir de un átomo de uranio y uno de carbono es cercana a diez millones. La fusión nuclear controlada es una alternativa todavía mayor, más limpia y segura, pero todavía subsisten problemas técnicos y económicos. Se han construido varios reactores experimentales, pero ninguno ha producido más energía que la que consume. No se espera que haya centrales comerciales de este tipo antes de 2050. Existen desarrollos tecnológicos en proceso que utilizan métodos más seguros, tanto para el procesamiento como para la disposición. Entre las tecnologías experimentales se pueden mencionar la del reactor integral rápido, la del reactor de lecho de bolas y la del reactor subcrítico. Hay experiencia de plantas piloto de algunas de ellas. El futuro de esta tecnología depende de los costos y de la solución a los asuntos de seguridad.

Hoy hay unas 440 centrales nucleares con una capacidad instalada de 368 GW. La mayoría de ellas tiene más de 15 años de construida. Aproximadamente otras 100 centrales se han cerrado después de su construcción y operación que se inició al final de los años 50. El precio actual se estima en 40 centavos de dólar por kWh. Sus defensores argumentan que es la única tecnología que tiene incorporados todos los costos ambientales y que es realmente confiable, que para poder comparar este valor con otras fuentes habría que incorporar tanto los costos ambientales como los de la confiabilidad, ninguno de los dos se tiene realmente en cuenta.

4.4.7. Otros temas

Otros asuntos relacionados con el futuro energético son los siguientes:

Por básicos principios termodinámicos, en los procesos de transformación hay siempre pérdidas. Esto es importante para analizar el impacto ambiental de conversiones, que pueden ser viables desde el punto de vista económico, pero que pueden tener un balance negativo desde el punto de vista de emisiones de gases invernadero. Por ejemplo, hace rato que Sur África ha usado el proceso Fischer—Tropsch para convertir carbón en gasolina. Este proceso requiere el doble de átomos de carbono por cada átomo de carbono en la gasolina producida, y por tanto es un emisor neto de CO₂. Aunque es posible que desde el punto de vista económico, político o práctico para ese país se justifique este tipo de procesos.

La confiabilidad del suministro de energía es fundamental para los consumido-

res, sean residenciales o del sector productivo. Esto pasa por elementos básicos de calidad, de diseño y funcionamiento de los mercados. La aparición de nuevas fuentes significa la necesidad de encontrar nuevos mecanismos para atender la demanda sin degradar la confiabilidad.

Las tecnologías para el secuestro de carbono apenas se están desarrollando pero seguro que jugarán un papel cada vez mayor en el futuro.

La energía geotérmica es una alternativa atractiva en algunos lugares, con un importante potencial de desarrollo en vista de que usa una tecnología relativamente conocida.

Las basuras pueden eventualmente ser una fuente renovable no despreciable para las ciudades.

4.5. Ejercicios

4.5.1. El sector de energía en Colombia ha evolucionado bastante en los últimos 20 años. Consulte la situación actual, compare con el diagnóstico de Fonade [1982] y UPME [2003].

4.5.2. Discuta ventajas y desventajas de los motores de explosión a gasolina, diésel, gas natural y mezcla de gasolina y etanol. Considere la eficiencia energética, las emisiones, la confiabilidad y los aspectos prácticos.

4.5.3. Consulte la calidad del combustible diésel en Colombia, compare con los estándares mundiales y con el bio-diésel. Discuta la situación de la contaminación en las ciudades por el transporte público mediante buses a diésel, las alternativas de solución.

4.5.4. Seleccione una de las fuentes de energía (solar, eólica, hídrica, mareomotriz, geotérmica, OTEC, hidrógeno, biocombustibles) y consulte el panorama internacional y Colombiano.

4.5.5. Discuta las diferencias en el impacto de la arquitectura bioclimática en el uso racional de energía entre las regiones tropicales y las zonas templadas o de altas latitudes.

4.5.6. Estime el impacto energético y en emisión de gases de la política de uso de transporte público para una ciudad como Medellín. Considere diferentes escenarios: todo el transporte en carros privados, todo en transporte masivo tipo Metro, todo en buses a diésel, todo en buses a gas natural, mezcla en proporción cercana a la actual, mezcla con mayor participación de la bicicleta. Discuta.

CAPÍTULO 5

Agua

Con respecto al agua para uso doméstico el lema principal del informe del Consejo Mundial del agua [Cosgrove and Rijsberman, 2000] resume perfectamente el contenido de este capítulo: “Hay una crisis del agua. Pero no es por falta de agua para satisfacer nuestras necesidades. Es una crisis por un manejo tan malo que ha conducido a que cientos de millones de personas y el ambiente sufran gravemente”. Con respecto al agua para uso productivo sí hay escasez en algunos lugares y épocas, lo que va a afectar globalmente al resto de la población a través del comercio de alimentos.

Las fuentes principales para este capítulo son Rijsberman [2006]; Gleick [2005]; Cosgrove and Rijsberman [2000]; Gleick et al. [2002] y las páginas Web del Consejo Mundial del Agua: <http://www.worldwatercouncil.org>, El Centro para Investigación Ambiental de Alemania <http://www.usf.uni-kassel.de> y el Programa Cooperativo para el Agua y el Clima <http://www.wac.ihe.nl> y el Consenso de Copenhagen <http://www.copenhagenconsensus.com>.

5.1. Crisis

5.1.1. Falta de acceso

Aproximadamente una de cada seis personas carece de acceso adecuado al agua potable, es decir unos mil cien millones de personas. La situación en alcantarillado es peor, se estima que casi la mitad de la población mundial vive en situaciones inadecuadas de sanidad. Como resultado mueren alrededor de dos millones de personas al año por enfermedades de origen hídrico, 90 %

de ellas niños, es decir unos 5 000 niños mueren diariamente por esta causa [Rijsberman, 2006]. Hay regiones donde las mujeres y los niños gastan buena parte de sus vidas transportando pesados depósitos de agua sobre sus cabezas y espaldas.

La situación en los países en desarrollo no ha mejorado a pesar de masivas inversiones en acueductos, sistemas de distribución, plantas de tratamiento y alcantarillados mediante programas bilaterales, la financiación del Banco Mundial y demás organismos internacionales y de la intensa campaña de la década del agua, 1980–1990. El asunto es tan grave que ameritó una meta en la Declaración del Milenio (Apéndice A.1) para tratar de reducir a la mitad la proporción de la población sin acceso sostenible a agua potable y sanidad básica para el 2015. La magnitud de la carencia y un elemental realismo justifican que sólo se aspire a reducirla a la mitad. En algunas regiones hay progresos que permiten predecir que se cumplirá, pero no en todas. Como se verá, otra cara de la moneda de esta crisis de suministro es el desperdicio.

5.1.2. ¿Agotamiento?

A pesar del vertiginoso crecimiento del uso del agua —en el siglo pasado se multiplicó por seis, mientras que la población se triplicó— la falta de suministro adecuado a tan alto porcentaje de la población no se debe a un agotamiento del recurso. Sin duda el recurso hídrico en el mundo es ampliamente suficiente para abastecer las necesidades domésticas, incluso la demanda industrial y agrícola que son mucho mayores. Las dificultades provienen de la falta de capital físico o institucional para hacer las inversiones, operar y mantener los sistemas de abastecimiento necesarios.

La inadecuada distribución del recurso en el espacio y el tiempo puede producir en algunos lugares o épocas situaciones de déficit. Pero la tecnología para resolverlas es bastante conocida, y para el caso de las necesidades básicas domésticas que son pequeñas, en comparación con la demanda industrial o agrícola, totalmente manejable.

Se estima que unos 25 litros por persona y por día son suficientes para lo más esencial y que con 60 se cubre adecuadamente todas las necesidades básicas. Sin embargo, en Europa el consumo promedio es del orden de 8 veces el consumo más esencial y en los Estados Unidos casi 16 veces. Las diferencias se explican por la disponibilidad de lavadoras de ropa y platos, jardines para regar, carros para lavar y por hábitos asociados al nivel de vida.

Las necesidades para la agricultura son mucho mayores, un kilogramo de granos requiere mil litros para su producción, y la misma cantidad de carne puede requerir hasta 13 veces más. Se estima que la dieta típica diaria de un estadounidense requiere unos $5,4 \text{ m}^3$ para producirse. Una dieta vegetariana, con

aproximadamente igual contenido nutricional requiere la mitad. En promedio, se requiere casi 60 veces más agua para producir la comida de una persona típica ($3,5 \text{ m}^3$) que para abastecer sus necesidades básicas (60 L). Además, es importante resaltar que aproximadamente el 90 % de el consumo doméstico retorna como agua servida y puede reciclarse, mientras que el agua evaporada no.

En resumen, el desafío del agua potable y alcantarillado depende del suministro de servicios confiables a precios asequibles, lo que es un problema de capacidad técnica, institucional y económica. El recurso hídrico para uso doméstico no es escaso, excepto para algunas grandes ciudades en zonas áridas. El agua para uso productivo, para producir alimentos, sí tiene el potencial de usar totalmente el recurso de una cuenca. Sin embargo, en condiciones reales no hay competencia real entre este uso y el doméstico, por la disparidad de las cantidades involucradas y por el gran valor asociado al uso para consumo humano que siempre tendrá precedencia.

Sin embargo, las ciudades, la agricultura y la industria tienden a contaminar las corrientes de agua, lo que impone una restricción adicional al uso del recurso aguas abajo.

La competencia real se da entre los usos diferentes al uso doméstico, en particular entre la agricultura y los servicios ambientales del agua. El aprovechamiento de los recursos hídricos puede llevar al secamiento de los ríos y al abatimiento exagerado de los acuíferos. Esto puede reflejarse en la reducción o desaparición de lagos. Es común una tendencia a ignorar el servicio ambiental que cumple el agua aparentemente desaprovechada. La valoración económica de estos servicios tiene dificultades metodológicas y de información, pero hay casos documentados de proyectos de irrigación que producen menor valor que el que suministraba el ecosistema destruido, un humedal por ejemplo.

Algunos autores hacen una separación conceptual entre el agua disponible como recurso hídrico, compuesta por el agua de los ríos, lagos y acuíferos, que denominan agua azul; y el agua verde, que corresponde a un recurso no directamente disponible, sobre el cual no hay decisiones que tomar y que retorna a la atmósfera por evapotranspiración. La primera se estima en un 40 % del total de la lluvia. Según los datos generales del balance hídrico global (ver Sección 2.1.3) el agua azul es del orden de $40\,000 \text{ km}^3$.

Para el año 2030 la demanda por agua se estima que será un 10 % mayor que la del año 2000, a pesar del ahorro importante que se espera habrá por racionalización del consumo y mejoras en la eficiencia. Actualmente, casi la mitad del agua dulce disponible se utiliza para fines humanos, dos veces más que hace 35 años.

Sin embargo, con una visión más amplia toda el agua es útil para la humanidad porque los ecosistemas proporcionan bienes y servicios adicionales al

consumo directo. Para asegurar la sostenibilidad hay que considerar el agua de forma integral, para así equilibrar todas las formas de demanda, incluyendo la doméstica, la agrícola, la industrial y la ambiental. Las decisiones deben reconocer la interdependencia de tres dimensiones: (i) el uso del suelo y el ambiente en general afectan y son afectado por el manejo del agua, (ii) las interrelaciones entre la dimensión económica y social, la hidrología y los ecosistemas, y por último, (iii) las escalas internacional, nacional y local están interrelacionadas.

El crecimiento de la demanda para usos productivos y algunos patrones de variabilidad climática regional ya han producido síntomas claros de agotamiento. Por ejemplo el lago Chad en África se ha reducido al 5 % del área registrada en los mapas de 1960 debido al incremento en el uso para irrigación del agua de los ríos que lo alimentan. Situación semejante ocurre con el mar Aral en Asia Central, el mar de Galilea o Lago de Tiberiades y el Mar Muerto en el Medio Oriente, numerosos lagos en China y el lago Owens en California. Casi todos estos casos son de magnitud y afectan grandes cantidades de personas. La pesca en el Aral desapareció, las ciudades portuarias están abandonadas, la costa ha retrocedido hasta 250 km en algunos sitios. En este caso la utilización de las aguas de los ríos Amu Daria y Sir Daria para irrigar grandes cultivos de algodón se ha identificado como la causa, pero probablemente hay además fluctuaciones climáticas. Una consecuencia de la desviación de los ríos en esta zona de alta evaporación es el aumento de la salinidad que conlleva una crisis ambiental. El caso de China es también dramático, se habla de provincias con más de 2000 lagos desaparecidos [Heng, 2002]. En la India también hay lagos que han reducido su área, por ejemplo el Dal ha pasado de 75 a 12 km². En México el lago Chapala cerca a Guadalajara se ha reducido en un 80 %.

El efecto también se evidencia en la disminución del caudal de los ríos y quebradas, incluso algunos se han secado y otros lo hacen en alguna época. Entre los más grandes y conocidos se pueden listar el río Colorado en Estados Unidos que muchas veces no llega a México, el río Amarillo en China, el Amu Daria ya citado, el río Nilo en Egipto, el Ganges en la India, el Indo en Pakistán, el Tigris y el Eufrates en Irak y el Mekong en el Sureste de Asia. En algunos casos la construcción de represas es la responsable del secamiento aguas abajo, en todos los casos el aumento en el uso del agua es un factor. El número de presas ha aumentado, y se estima que las medias y altas se ha multiplicado por 10 en los últimos 50 años hasta llegar a una 50 000. En muchos lugares hay oposición creciente a la construcción de nuevas presas por los problemas ambientales asociados debido a los cambios del paisaje, la inundación de tierras productivas, la interrupción de la migración de especies, los efectos aguas abajo por reducción de caudal, el aumento de la evaporación y los efectos sobre el clima local. Sin embargo, los embalses de regulación son una posibilidad de almacenar agua sobrante en épocas de excesos para épocas de déficit que cada

vez veremos menos.

Otro síntoma menos visible en la superficie pero igual o más grave es la sobreexplotación de acuíferos. El agua subterránea es un recurso muy importante que involucra de manera natural regulación y filtración y por tanto en la mayoría de los casos excelentes propiedades físicas y biológicas, lo que redundaría en bajos costos de almacenamiento y tratamiento. Como con cualquier recurso, la falta de seguimiento y su inadecuada utilización puede llevar a su agotamiento o deterioro. En general un acuífero se puede explotar de manera sostenible a una tasa igual a la tasa de recarga promedio de largo plazo. La extracción por encima de esta tasa configura una sobreexplotación del recurso. También, existen acuíferos fósiles cuya extracción lleva al agotamiento, son recursos no renovables (cero o muy baja tasa de recarga). Los ejemplos más citados de sobreexplotación están en el norte de China, el oeste Norteamericano y en Arabia Saudita. El caso de China se considera grave, pues el nivel de los pozos puede haber descendido hasta 3 metros por año y está por debajo de 1000 metros en los sitios más críticos como en Beijín y hasta 300 metros en zonas agrícolas, lo que aumenta los costos de extracción.

Algunos seguidores de la economía mundial piensan que China, después del crecimiento económico espectacular de los últimos años, va a entrar en un período de reducción de su capacidad de producción de alimentos [Brown, 2003]. Su producción de granos tuvo un máximo en 1998 de 392 millones de toneladas, y ha caído en cuatro de los ocho años siguientes para llegar a 358 millones de toneladas en el 2005. Este descenso de 34 millones de toneladas es mayor que toda la producción anual de Canadá. En los últimos años su demanda ha excedido la producción, para lo cual ha recurrido a grandes reservas que ya llegaron a su fin. En el año 2004 sus importaciones alcanzaron 7 millones de toneladas de granos. Se calcula que la reducción de su producción puede llegar a unas 40 millones de toneladas, suficiente para alimentar 120 millones de personas. La dimensión del mercado de China, sumada a su creciente capacidad de compra y a la prevista disminución de la producción agrícola como resultado de la sobre explotación de sus recursos hídricos, pone de presente la manera moderna como se tranza el agua, escondida en los productos agrícolas. En el futuro el caso de la India puede ser más serio porque tiene menor nivel de maniobra y sus consumos de subsistencia son precarios. La reducción de los niveles freáticos que ya empieza a observarse en algunas provincias puede llevar al abandono de la irrigación. Hasta ahora la producción viene creciendo, la pregunta es si podrá continuar al ritmo de la demanda cuando el recurso hídrico sea limitante.

En algunos estados de la unión americana ya empiezan a aparecer problemas de sobreexplotación de acuíferos. Sin embargo el efecto se cree será menor por el tamaño del área afectada y porque apenas una quinta parte de la producción

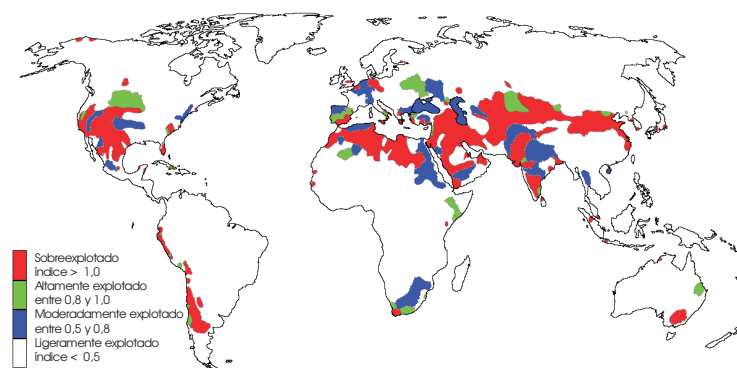


Figura 5.1: Índice de escasez del agua estimado para el año 2025 para un escenario de extrapolación de tendencias. Adaptada de Cosgrove and Rijsberman [2000].

de granos viene de irrigación, mientras que en China y la India las cifras correspondientes son cuatro y tres quintas partes. Pakistán experimenta problemas semejantes a la India. Irán, Arabia Saudita, Yemen, Palestina, Israel y México pueden tener incluso mayores inconvenientes en algunas regiones.

En alguna medida, la sobreexplotación va asociada a un uso ineficiente por bajos costos, por subsidios de la electricidad para bombeo y bajas tarifas del agua que no reflejan los costos, en particular los costos ambientales. Se estima que más del 10 % del consumo rural corresponde a desperdicio y que la posibilidad de ahorro mediante tecnologías más adecuadas es todavía mayor.

Cosgrove and Rijsberman [2000] presentan un mapa del índice de escasez del agua para el año 2025, calculado como la relación entre la demanda y la disponibilidad del recurso renovable (ver Figura 5.1). Las zonas de alta o muy alta escasez corresponden a deterioro de las fuentes en términos de calidad y cantidad. Es decir por sobreexplotación de acuíferos, secamiento de ríos o lagos, eutrofización por contaminación orgánica, intrusión salina, contaminación térmica o química. La heterogeneidad de la situación es clara, las regiones con dificultad corresponden a las enumeradas anteriormente, aunque la severidad del problema puede diferir. El aumento del índice de escasez se debe al crecimiento de la demanda por crecimiento de la población y por el desarrollo económico (aumento del consumo per cápita, necesidades de energía, necesidades de alimentos). El pronóstico es que siguiendo la tendencia, sin cambios de política, la demanda pasa de 3 800 km³ en 1995 a unos 5 200 km³ en 2025, con alguna variación en función del área agrícola irrigada. Esto implica que la escasez sube más del 60 %, incluyendo grandes áreas en África, Asia y América Latina. Esta predicción es más pesimista que la anteriormente reseñada.

5.1.3. Agua en botella

El caso de la explosión del consumo de agua en botella merece una sección propia (la fuente principal para esta sección es el reporte de Emily Arnold en EarthPolicyInstitute [2006]). En el año 2004 el consumo global fue de 154 mil millones de litros. En algunos lugares esto corresponde a un promedio de dos vasos de 250 mL por persona y por día. El fenómeno es más llamativo si se considera que la penetración incluye ciudades en las cuales el agua de la canilla es de mejor calidad y sabor, y que la diferencia de precios puede llegar a factores de 10 000. En Colombia una botella de 500 mL en la calle tiene un precio del orden de 1 000 pesos. Para comparar, con los mismos mil pesos en Medellín se puede tomar de la canilla el equivalente a 2 000 de esas botellas, y los mismos 500 mL de gasolina valen 700 pesos. Uno de los descubrimientos más antiguos y eficientes de la humanidad, el transporte de agua mediante acueductos, está siendo parcialmente substituido por este método tan ineficiente para transportar en ocasiones hasta distancias intercontinentales. Por ejemplo, Arabia Saudita importó un millón cuatrocientas mil botellas de Finlandia, a más de 4 000 km de distancia.

Los consumidores principales son Estados Unidos, México, China, Brasil, Italia y Alemania. Los italianos tienen el record de consumo per cápita, 1,84 litros por día. El crecimiento mayor ha ocurrido en los países en desarrollo como Líbano, México, Emiratos Árabes y China con incrementos del 50 % anual en los últimos 5 años. En la India y la China el consumo se ha triplicado en estos 5 años.

Las botellas más comunes son de tereftalato de polietileno (PET), un material derivado de los combustibles fósiles con buenas propiedades de transparencia, densidad, permeabilidad y posibilidad de reciclaje. Se estima que en los Estados Unidos se consumen anualmente unos mil quinientos millones de barriles de petróleo para fabricar estas botellas, suficiente combustible para mover cien mil carros por un año. La tasa de reciclaje es baja a pesar de la posibilidad tecnológica. En Estados Unidos el 86 % se convierte en basura. Su incineración produce contaminantes como metales pesados y derivados del cloro. Las botellas enterradas pueden tardar unos mil años para degradarse.

Los consumidores asocian el uso del agua en botellas a un estilo saludable de vida. Pero está demostrado que su calidad no sigue estándares tan rigurosos y regulares como los de los acueductos. De hecho, más o menos el 40 % del agua en botellas proviene de la canilla, a la que le añaden minerales que no tienen ningún beneficio para la salud. Además, el almacenamiento prolongado requiere la adición de mayores dosis de químicos con efecto antibiótico (cloro u ozono por ejemplo) que pueden tener efectos negativos. De hecho, no hay tranquilidad total respecto a los efectos toxicológicos del PET por efecto de

los químicos contenidos en el agua comercial [Evandri et al., 2000].

La ventaja de la comodidad del transporte a sitios de trabajo o a donde se practica el deporte simplemente se puede lograr mediante el almacenamiento de agua fresca de la canilla en botellas usadas bien lavadas. De manera semejante si se desea refrigeración. La ventaja económica para el consumidor puede ser inmensa y para la sociedad también. Hay infinidad de reportes de experimentos en los se da a probar agua de botellas de marcas diferentes y de la canilla, sin reflejar el origen. De estas pruebas ninguna se distingue significativamente con respecto a olor, sabor, apariencia, sensación en la boca o ninguna otra característica [Standage, 2005]. Es decir, es un consumo fundamentado en la imagen y la moda.

Se estima que la inversión adicional necesaria para lograr suministro total de agua potable a todos los habitantes de la Tierra es de mil setecientos millones de dólares al año. Para mejorar la salubridad pública, con cubrimiento total de alcantarillado, se requieren otros nueve mil trescientos millones por año. El total es menos de un cuarto de lo que se gasta la humanidad al año en agua en botellas.

5.1.4. Impacto del Cambio Climático

En el Capítulo 3 se discutió en detalle el efecto del calentamiento global por cambio climático sobre el ciclo hidrológico. En resumen se espera incremento de la evaporación, de la humedad atmosférica y de la intensidad de la precipitación de los eventos extremos. No es claro cuál será el efecto sobre la lluvia total y sobre la duración de los períodos secos. En general se espera que en algunas regiones aumente el riesgo de sequía. Desde la perspectiva de clasificación del recurso hídrico entre agua azul y agua verde, el incremento de la evaporación significa una disminución del recurso aprovechable.

Además, el cambio climático puede afectar negativamente las obras de infraestructura. Por razones obvias los sistemas de aprovechamiento hídrico siempre están sometidos a los efectos de los eventos extremos de precipitación. Los ingenieros diseñan tales obras para soportar en su vida útil eventos de diseño que se seleccionan de acuerdo a un balance entre seguridad contra las fallas eventuales y economía de costos de las obras. En principio, la estimación del riesgo se apoya en la extrapolación hacia el futuro de las probabilidades de falla deducidas de las condiciones históricas. Si el cambio climático trae como una de sus consecuencias el incremento de estas probabilidades, incluso las obras bien diseñadas experimentarían un incremento en el riesgo de falla. A nuestro juicio, es imperativo una revaluación de los métodos tradicionales usados por los ingenieros y en consecuencia de los riesgos de las obras en funcionamiento. Esta conclusión se refuerza si se tiene en cuenta que desafortunadamente, por

diversas razones, muchas obras hidráulicas tienen diseños inapropiados.

En resumen el cambio climático puede disminuir la disponibilidad del recurso hídrico, en algunas regiones aumentar la duración o frecuencia de sequías y aumentar el riesgo de eventos extremos de precipitación. Esto último puede afectar la infraestructura de aprovechamiento de los recursos hídricos.

5.1.5. Polución

El incremento en el uso del agua trae consecuencias negativas en los ecosistemas acuáticos. Más de la mitad de los principales ríos está seriamente degradados en su calidad. Esto se ha acelerado desde 1970 por el aumento de las descargas industriales y domésticas. En los Grandes Lagos americanos se aprendió la importancia del control de ciertos contaminantes, en particular los compuestos del fósforo, asociados a detergentes y agro-químicos. La estrategia obvia es la regulación sobre la utilización de sustancias negativas y el control de vertimientos. La remoción posterior de algunos contaminantes industriales, como sustancias tóxicas o metales pesados de cuerpos de agua o corrientes puede ser muy costosa.

Es importante mencionar en este lugar el creciente número de especies amenazadas o en peligro de extinción por actividades humanas, entre las que se encuentra la desaparición de humedales y la deforestación.

5.2. Naturaleza del agua

5.2.1. ¿Qué es el agua?

El agua es fuente de vida y es necesaria para todos los ecosistemas. Puede decirse incluso que el agua es vida. El agua purifica, transporta, disuelve, conduce calor, energía, nutrientes, es elemento fundamental del paisaje, de la agricultura, de la industria, de la vida doméstica. Puede transmitir enfermedades, desencadenar inundaciones, deslaves y muerte. En casi todas las culturas juega un papel mítico o religioso.

Tiene simultáneamente el carácter de recurso renovable y de no renovable. Y desde el punto de vista económico el agua puede ser un bien público, un bien común y un bien privado (ver Sección A.5). Los bienes públicos son aquellos que no generan rivalidad y no son excluibles. Un bien es no rival cuando el uso de éste por una persona en particular no compite con el consumo por el resto de personas, y no excluible quiere decir que no se puede excluir a nadie de usarlo o tenerlo. El agua en su estado natural, como parte del medio ambiente puede ser un bien público. Por ejemplo el agua del mar, un lago, un humedal proporcionan servicios ambientales y paisajísticos sobre los que no

hay posibilidad de excluir y que no generan rivalidad; por lo tanto son un bien público. En otras circunstancias hay lugar a rivalidad, aunque sigue siendo no excluible; en ese caso es un bien común. Un ejemplo es la utilización del agua de una fuente finita. La asignación de mercedes o derechos de utilización es una manifestación de ese carácter de bien común que genera rivalidad, aunque no se genera derecho de propiedad privada. Cuando el agua se capta, se procesa, se purifica y se transporta, se convierte en un bien privado, excluible y rival. En este caso hay lugar a precios y de una cierta manera a un mercado del agua. En general el acceso al agua genera externalidades positivas, mejora el bienestar para todos. Su carácter como bien público, o como bien común requiere la intervención del gobierno. Sin desconocer el papel del Estado como regulador en los casos en los que el agua es un bien privado. Adicionalmente, se considera que por su carácter esencial para la vida existe un derecho de todas las personas a disponer de agua potable.

De estas definiciones y diferentes roles del agua se desprenden consecuencias sobre la legislación, la utilización, las tarifas, el acceso y el medio ambiente. En la Sección 5.4 se profundiza sobre estos asuntos.

5.2.2. Usos del agua

En varias declaraciones internacionales se ha proclamado que independiente de las condiciones de desarrollo y de las condiciones sociales todas las personas tienen el derecho a tener acceso a agua potable en cantidad y calidad adecuada para satisfacer sus necesidades básicas. Igualmente se ha expresado la prioridad de este uso sobre todos los demás.

Las necesidades básicas cambian con la cultura, el clima, la tecnología, la dieta, y la manera como se accede al agua. Por ejemplo si el acceso es mediante una pila pública a más de un km de distancia el consumo es menos de 10 L por persona y por día, si la distancia es menos de un km el consumo aumenta a 20 L. Si hay tubería domiciliar se pasa a un rango entre 60 y 100 L, mientras que en lugares con jardín puede incluso llegar a 400 L por habitante y por día.

Consumo, captación o toma o derivación, uso bruto con recirculación y uso consuntivo son diferentes conceptos que corresponden a algunas variaciones que es necesario tener en cuenta cuando se comparan datos con diferente origen. La toma o derivación se refiere al acto de tomar el agua de una fuente y llevarla a un sitio diferente para uso o almacenamiento; no toda el agua captada se consume, es posible que se use y se retorne toda o parcialmente luego del uso, con algún cambio en sus propiedades. Por ejemplo el agua para refrigeración de una termoeléctrica se retorna casi en su totalidad, aunque a una mayor temperatura. En procesos industriales es común que el agua se recircule varias veces, por lo que el consumo bruto es mayor a la captación.

El uso consuntivo se refiere a la utilización que impide el uso posterior por evaporación, contaminación o incorporación en un producto terminado.

Los requerimientos estrictamente necesarios para sobrevivir también cambian de acuerdo al clima, la actividad, el estado de salud y la masa corporal. Un promedio de 3 L por día y por persona se considera razonable, y puede aumentar hasta 5 L para condiciones más extremas de clima. Los cálculos a partir de las necesidades de hidratación según la dieta alimenticia dan resultados semejantes.

Además es necesario un suministro básico para servicios sanitarios, componente fundamental para complementar el beneficio en la salud del suministro de agua potable. Varios estudios demuestran que incluso tiene un impacto mayor en la salubridad. Hay varias tecnologías sanitarias con diferentes requerimientos de agua. La tecnología más tradicional implica un desperdicio grande de agua, hasta 75 L por vaciada. Con mejoras en los diseños de los aparatos es posible reducir este consumo hasta unos 10 L, sin desmejora en los resultados. Incluso, hay tecnologías secas, en las cuales el requerimiento es muy bajo, prácticamente cero (fosos de ventilación mejorada, letrinas de doble foso con ventilación mejorada, letrinas de compostaje, letrinas de compostaje continuo). La tecnología tradicional no sólo consume grandes cantidades de agua que contaminan quebradas, ríos, lagos y zonas costeras, sino que además desperdicia el fósforo, nitrógeno y los carbohidratos presentes en los desperdicios humanos. La tecnología del compostaje incorpora la descomposición microbiana y permite el aprovechamiento posterior como abono agrícola. Estas nuevas tecnologías requieren cambios culturales y de infraestructura importantes, que razonablemente tomaran un tiempo en producirse, pero que podrían promoverse más activamente desde las autoridades ambientales. En todo caso, una provisión adecuada de agua para higiene es necesaria, incluyendo el aseo de las manos y baño. Algunos estiman este requerimiento en 40 L por persona y por día, lo que incluye alguna consideración para sanitarios y unos 15 L para ducha. Esto último puede cambiar bastante según los hábitos y la tecnología. Nuevamente hay lugar a tecnología eficiente con reducciones substanciales en el consumo sin desmejoramiento del servicio.

Para la preparación de alimentos y el lavado de platos se estima un consumo adecuado de 10 L por persona y por día. Igual hay mucha variabilidad cultural y tecnológica. Dispositivos simples que mejoran el flujo en la canilla pueden significar un ahorro importante. Para lavado de ropa se calcula un consumo básico de 10 L por persona día.

La suma de estos consumos básicos llega a 60 L por persona y por día para uso doméstico. Esta cifra es un tanto mayor que las estimaciones más estrictas de los organismos internacionales, pero se considera realista para propósitos de planeación [Gleick, 1996].

En general el uso doméstico representa sólo un 10 % del total, mientras que el 70 % es para riego y el 20 % para la industria. El uso y comercio no visible del agua asociado a los productos agrícolas ya ha sido mencionado y debe de tenerse en cuenta cuando se considere el panorama general.

5.2.3. Variabilidad

No sobra insistir sobre este aspecto ya mencionado en la Sección 2.1.3. Una de las propiedades más características del agua es su variabilidad espacial y temporal. Hay temporadas secas y lluviosas. Se estima que en promedio en un sitio cualquiera llueve un 10 % del tiempo, pero hay lugares prácticamente sin lluvia y otros donde casi todos los días llueve. Aun en los días con lluvia, hay grandes diferencias entre unos y otros, tanto en la duración como en la intensidad. En algunas regiones la lluvia es predominantemente nocturna, en otros es en la tarde. Hay sitios donde la mayoría de la lluvia cae en aguaceros convectivos de corta duración y alta intensidad. Hay variación en temporadas. En muchas regiones tropicales sólo hay una temporada de lluvias al año, los llamados monzones de verano. Otras regiones más ecuatoriales tienen dos temporadas lluviosas, y en las regiones de latitud media es común que la mayor precipitación se presente en invierno y en forma de nieve. Entre un año y otro la lluvia cambia, hay variabilidad interanual asociada a fenómenos climáticos como ENSO o a variabilidad interdecenal como la oscilación del Pacífico. En África se ha experimentado sequías prolongadas de varias decenas de años. Incluso si se mira escalas de tiempo mayor puede haber otros patrones. Esto se refleja en los caudales de los ríos, los niveles de los lagos y la profundidad del nivel freático.

La variabilidad de las aguas superficiales se puede regular mediante el almacenamiento en depósitos, que pueden ir desde pequeños tanque domésticos hasta grandes embalses artificiales que inundan cientos de kilómetros cuadrados.

Los ecosistemas naturales tienen capacidad de almacenamiento importante. Los suelos tienen capacidad de infiltrar el agua lluvia y almacenarla para el uso de las plantas en períodos sin precipitación. Los excesos percolan a acuíferos de aguas subterráneas que son grandes depósitos naturales. Los ríos, ciénagas, humedales y lagos están en contacto con los suelos y acuíferos y reciben y entregan agua a estos depósitos según las diferencias de nivel. El manejo adecuado de los suelos, la preservación de una cobertura vegetal adecuada y el control de la erosión son aspectos fundamentales que determinan la capacidad de las cuencas para regular el agua. En principio, mientras mejor el estado de las cuencas mayor la regulación natural. Y en sentido contrario, el manejo inadecuado de la cuenca se manifiesta en un régimen hidrológico más irregular, con eventos máximos más críticos y mayores temporadas de sequía. Una

de las tareas fundamentales del hidrólogo es el conocimiento y cuantificación de la variabilidad y el diseño de los sistemas de regulación adecuados para el aprovechamiento del recurso hídrico. La predicción de corto y largo plazo de la variabilidad también es un elemento fundamental para el planeamiento de la operación de estos recursos.

5.2.4. Calidad

La calidad del agua es fundamental según su uso. Los estándares mínimos son diferentes según el caso. En general la calidad depende de características físicas, químicas y biológicas. A continuación se presenta una breve introducción.

Las propiedades físicas del agua dependen fundamentalmente de su temperatura y de la carga de sedimentos que transporta. En condiciones naturales la lluvia y las corrientes superficiales y subterráneas interactúan con los suelos y la vegetación, realizan trabajo de meteorización, erosión y disolución sobre la corteza terrestre. La escorrentía transporta los productos que eventualmente pueden depositarse en lugares intermedios o viajar hasta el mar. El sedimento en suspensión y solución tiene efectos sobre las propiedades ópticas de color y turbidez, que eventualmente pueden afectar las propiedades biológicas y químicas. Por ejemplo, la tasa de actividad fotosintética depende de la profundidad a la cual penetra la luz que es afectada por la turbidez. Los granos de sedimento son lugar para el desarrollo de poblaciones de microorganismos. La concentración de sedimentos tiene efecto sobre la densidad y la viscosidad del agua, lo que puede afectar el flujo, producir estratificación o corrientes de densidad. La temperatura también afecta la densidad y la viscosidad y en tal sentido el flujo. Además, el efecto de la temperatura sobre la solubilidad de gases y la actividad biológica es de importancia. En general, a mayor temperatura menor solubilidad de los gases. Esto se refleja en el oxígeno y el CO_2 . La temperatura del agua es el resultado del balance de energía, la absorción y emisión de radiación, el flujo de calor sensible y latente de evaporación, la estructura vertical y la mezcla que depende del flujo. En condiciones naturales el agua transporta sedimentos y esto en sí no es una señal de contaminación. Sin embargo para su utilización es necesario proceder a su remoción mediante tanques de sedimentación y procesos de filtración.

Por sus propiedades como solvente universal, el agua contiene diferentes sustancias en solución. En particular transporta subproductos de la meteorización de las rocas, carbonato de calcio y carbonato de sodio, compuestos orgánicos y otros minerales. Para uso doméstico hay unos estándares definidos que limitan la concentración de estas sustancias y de otras de origen natural o antrópico que pueden llegar a ser desde desagradables hasta nocivas. El balance del oxígeno es fundamental para la calidad del agua, por sus efectos biológicos.

Depende del intercambio con la atmósfera, la producción por fotosíntesis, y el consumo por la respiración de los organismos, en particular la descomposición aeróbica de la materia orgánica. Los vertimientos humanos pueden significar una demanda adicional de oxígeno para las corrientes, lo que genera un deterioro de calidad por eutroficación. En general el nitrógeno y fósforo provenientes de agroquímicos y detergentes pueden tener impacto significativo en el equilibrio biológico, el crecimiento de algas y producir deterioro de la calidad del agua. Los pesticidas y otras sustancias tóxicas son compuestos orgánicos complejos con impacto negativo por su tiempo de permanencia, bio-acumulación, e impacto sobre las hormonas de animales y hombres. Por ejemplo, los compuestos organo-clorados son motivo de preocupación por sus efectos nocivos sobre la fauna.

Una corriente natural sostiene gran diversidad de organismos, algunos de ellos microscópicos. En estado natural y condiciones saludables es importante la diversidad. Existen especies que sirven como indicadores de calidad porque no están presente cuando ocurre deterioro. Para el consumo humano se realiza purificación por diversos procedimientos.

5.3. Propuestas

Para avanzar hacia soluciones reales sobre los problemas del agua hace falta reformar las instituciones que manejan el agua. Es necesario establecer políticas económicas para una adecuada financiación del servicio y para que los consumidores reciban la señal adecuada que conduzca a uso eficiente. La agricultura por irrigación debe hacer uso del recurso de manera sostenible, en particular es posible mejorar la eficiencia tecnológica. Las cuencas internacionales requieren manejo concertado. La función de los ecosistemas acuáticos debe valorarse y buscar maneras de incorporar esta señal al mercado.

5.3.1. Derecho y participación

El derecho al acceso adecuado al consumo básico de agua potable para todas las personas debe adquirir la característica de un derecho fundamental. Los asuntos del agua son de altísima prioridad por su impacto sobre el bienestar y la salud.

Para alcanzar los objetivos de la Declaración del Milenio en relación con el agua se deben tomar varias medidas: declarar el derecho al agua, descentralizar la responsabilidad, aumentar la financiación, evaluar, planificar y hacer seguimiento a los recursos hídricos.

Es frecuente la fragmentación para el manejo del recurso hídrico. Por ejemplo, el recurso subterráneo y el superficial no deben quedar en manos de institucio-

nes diferentes. El planeamiento y desarrollo de nuevos proyectos de desarrollo no debe separarse de la gestión para un uso adecuado y eficiente. Los diferentes usos deben confluir a un organismo de planeación integral. Mientras más cerca esté la institución al usuario final, mejor el control y el rendimiento de cuentas. La descentralización no compite con la coordinación.

Las agencias responsables por el manejo del agua deben empoderarse, tener los recursos, la capacidad profesional y técnica y liberarse de vicios políticos y de corrupción.

5.3.2. Planeación

Parte fundamental de la planeación es la gestión sobre el uso eficiente, lo cual implica mejoras tecnológicas, precios adecuados y educación. Es posible obtener mejoras en eficiencia que impliquen ahorro de más del 30 % de los consumos actuales. Estas medidas blandas son tanto o más importantes que la inversión en infraestructura.

Se estima que por cada peso invertido eficientemente en recurso hídrico se obtiene un beneficio entre 3 y 34 pesos en bienestar y desarrollo económico. En particular hay lugares en los que el alivio de largas jornadas de recolección y carga de agua para las mujeres o los niños sería dramático. La mejora en la cifras de mortalidad y la salubridad pública son significativas. De allí se desprende también un aumento en la esperanza de vida de toda la población. La planeación adecuada involucra el conocimiento del recurso. Esto empieza por la medición de las diferentes componentes del ciclo hidrológico mediante adecuadas redes de estaciones de medición. Además es necesario desarrollar estudios de diagnóstico y caracterización del recurso, a diferentes escalas espaciales desde la nacional hasta la más local en la que se represente cada usuario. Los estudios de demanda y su proyección son fundamentales. El balance de oferta y demanda debe permitir la formulación de planes que eventualmente se concretan en proyectos. Cada proyecto debe estudiarse gradualmente de manera integral. Los inventarios deben permitir la selección de los proyectos más atractivos que pasan a prefactibilidad. Entre los mejores que resulten de tal etapa se procede a la profundización a un mayor nivel de refinamiento hasta finalmente llegar al diseño. Del catalogo de proyectos estudiados se prioriza la construcción de acuerdo a criterios múltiples que obligatoriamente deben incluir elementos ambientales y sociales además de los aspectos económicos, legales, técnicos y financieros. Las cuencas requieren de ordenamiento y planes de manejo.

La prevención de desastres, la revisión de los criterios de diseño de las obras hidráulicas, la reglamentación adecuada de la ocupación del terreno en zonas de riesgo, todas son elementos fundamentales para un adecuado manejo y

planificación del recurso hídrico.

Los sistemas de información con mediciones, series de tiempo de las observaciones, mapas, demanda, asignación de mercedes o derechos, obras, proyectos, usuarios y en general todo tipo de datos relevantes son elementos de gestión invaluable.

5.3.3. Uso Eficiente del Agua

Para el uso residencial ya se discutió sobre las posibilidades de uso eficiente, fundamentalmente en sanitarios, duchas, canillas y lavado de ropa. No sobra repetir que el impacto de tecnologías secas para sanitarios tiene además un importante impacto ambiental.

En algunos países no se desinfecta toda el agua residencial, sino que en la cocina se instala un filtro especial, de bajo caudal y muy eficiente. Esto ahorra bastante en costos de tratamiento y disminuye el efecto de químicos sobre los cuales no hay acuerdo total respecto a sus efectos sobre la salud, bien sea directamente o por reacción química con material de las tuberías.

La medición de los consumos debe ser una norma de obligatorio cumplimiento. Cada usuario debe tener un grado de participación adecuado para que conozca sus consumos y esté en capacidad de reaccionar ante cualquier error, fuga, o consumo excesivo. Debe además servir de apoyo para el seguimiento permanente a la calidad de agua. Los usuarios deben tener representación en los órganos de dirección y manejo de las empresas de servicios.

Las redes de distribución en las ciudades presentan cifras significativas de pérdida por fugas. El fortalecimiento técnico e institucional de las empresas de servicios públicos y el adecuado seguimiento es necesario para mejorar la eficiencia. Los consumos ocultos de agua que van asociados a la dieta alimenticia deben hacerse explícitos y hacer campañas educativas para un manejo responsable del recurso. Como se ha insistido, el consumo de agua para producir un kilogramo de comida puede aumentar hasta en factor de 300 a medida que la carne tenga mayor participación.

La irrigación es un uso del agua en el cual hay lugar a mejoras inmensas en la eficiencia. La tecnología del riego por goteo puede significar consumos hasta 100 veces menores que los métodos tradicionales, con incluso mayores rendimientos debido al adecuado manejo de abonos. Los costos de estos dispositivos han disminuido bastante y pueden seguir bajando a medida que su uso se extienda y que la tecnología se popularice.

Hay sitios específicos en los cuales la alternativa más económica para el suministro de agua potable es la desalinización. Su costo ha venido disminuyendo a medida que se ha generalizado su uso. En el año 2002 había unas 13 000 plantas en 120 países. Los costos energéticos siguen siendo altos, del orden de

6 kWh m^{-3} en la tecnología de ósmosis inversa y entre 10 y 20 veces más en otras tecnologías. El uso de energía solar para este propósito es una alternativa atractiva en algunos lugares.

Hay sitios áridos y zonas desérticas con necesidades extremas en los cuales la captura directa de agua atmosférica se ha convertido en una alternativa interesante. Los desarrollos tecnológicos han mejorado la posibilidad de utilizar estos métodos como complemento en otros sitios.

La recolección de la lluvia y su almacenamiento para posterior uso se ha practicado desde tiempos inmemoriales. Ante la presión creciente por su utilización y las mejoras en la tecnología de almacenamiento y de tratamiento en pequeña escala esta alternativa se hace más atractiva.

La recirculación del agua para fines domésticos no esenciales o para riego es cada vez más una alternativa y una necesidad.

5.4. Economía del agua

El premio Nobel de Economía, Amartya Sen, decía que “La reducción de la corrupción en los países en desarrollo mediante la apertura de mercados sería una razón suficiente para las reformas liberales, así no hubiera otro beneficio económico”. La idea es que no sólo se puede lograr tan importante mejora, sino que además es posible aumentar la cobertura, hacer una gestión adecuada y mejorar la eficiencia del uso sin desconocer los derechos de la población. El trabajo de Gleick et al. [2002] es una fuente importante para esta sección.

La Conferencia Internacional sobre el Agua de Dublin, Irlanda, en enero de 1992 concluyó entre otras cosas que: “el agua tiene un valor económico en todos sus usos alternativos y debe reconocerse como un bien económico”. Luego, en la Conferencia de la Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo de Rio de Janeiro en 1992 se reafirmó la necesidad de que la economía juegue un papel en el manejo eficiente de los recursos hídricos: “El manejo integral de los recursos hídricos se basa en la percepción del agua como parte integral del ecosistema, como un recurso natural y como un bien social y económico.” En el balance adecuado entre estas componentes está la clave.

No hay duda de que las dificultades en el acceso al agua para una fracción considerable de la población en los países en desarrollo proviene fundamentalmente de unas inadecuadas instituciones humanas más que de la escasez física del recurso.

La gratuidad o las bajas tarifas significan imposibilidad de recaudar los costos. Esto genera imposibilidad de financiación de nuevas obras, de un adecuado mantenimiento de la infraestructura y de control de calidad. Además, el consumidor no tiene ningún incentivo para el uso eficiente y no hay adecuada

asignación del recurso entre los diferentes usos. Como se ha repetido sobre este tema, la tarifa más cara es la que se paga por no tener el servicio.

La corrupción, el desgüeño administrativo y la ineficiencia burocrática son riesgos casi inevitables en empresas de servicios que funcionan con exclusiva financiación estatal, sin mecanismos que remuneren la eficiencia.

Además, es claro el papel de bien económico privado que el agua cumple cuando se dedica a uso agrícola o industrial.

La asignación del agua entre los diferentes usos y usuarios requiere mecanismos entre los que están los mercados, las decisiones democráticas, las burocráticas, y combinaciones de estos. Estos mecanismos deben maximizar el valor económico del agua cumpliendo la restricción de mantener el agua como un bien común. El uso racional requiere de señales claras a los consumidores, para evitar el desperdicio y para reflejar el costo para la sociedad según los diferentes usos. No es una sorpresa que en varios países la mayor oposición a las tarifas de agua para riego agrícola venga de los agricultores más ricos, que han disfrutado de subsidios estatales. Aunque esa crítica se disfrace de defensa de los más pobres. Claramente los mecanismo de mercado, sin ninguna intervención estatal, no tienen capacidad de mantener la eficiencia social necesaria por el carácter de bien común que el agua cumple.

Para mantener efectivamente el manejo del agua como un bien común es necesario resguardar el derecho al consumo básico para todos, la protección del medio ambiente y el control permanente para garantizar el uso racional del recurso. La satisfacción de las necesidades básicas de todos es una prioridad. Los requerimientos de los ecosistemas se deben cumplir. La búsqueda del uso eficiente debe quedar como un mandato en la legislación, mediante criterios económicos y mecanismos de mercado y con herramientas de planificación, seguimiento y control a cargo de las autoridades ambientales.

La posibilidad de participación privada en el sector de agua potable o alcantarillado debe limitarse a la administración de los recursos de infraestructura, las obras y los servicios administrativos. No respecto al agua y a la infraestructura misma que se deben mantener como bienes comunes. Para las eventuales inversiones en infraestructura en cabeza de empresas privadas debe usarse el método de la concesión, sin que haya lugar a derecho de propiedad sino únicamente a explotación por un tiempo determinado.

Hay unas funciones de vigilancia a las que el Estado no puede renunciar, por ejemplo la vigilancia ambiental, la prioridad del consumos básico, el control de las tarifas. El consumo básico debe ser subsidiado para los que lo necesitan. Los subsidios no deben ir a quienes no lo requieren, los subsidios no deben incentivar el desperdicio. Las tarifas deben ir amarradas a costos económicos justificados y no deben pagar el manejo ineficiente. Las inversiones deben ser de mínimo costo y siempre precedidas de medidas de uso racional. La estructura

de tarifas debe promover el uso eficiente y las medidas de conservación del recurso, mantenimiento de la infraestructura y control de pérdidas por parte de las empresas. El control de la calidad del agua debe estar reglamentado y vigilado por el Estado, los usuarios deben tener participación. La información sobre todos los asuntos de servicios públicos debe ser abierta y disponible para todos. La existencia de economías de escala en este sector genera una tendencia a la conformación de monopolio, por lo cual también es necesaria la vigilancia y la regulación del Estado.

Cualquier contrato de administración requiere un seguimiento y una cuidadosa redacción, incluyendo cláusulas que protejan el bien común, el medio ambiente y el derecho al consumo fundamental. Deben incluir cláusulas de resolución de conflictos en las que el bien común esté resguardado.

A pesar de la controversia por la asignación de criterios económicos al manejo del agua, incluyendo el cobro de tarifas y la posibilidad de la privatización de las compañías de servicios públicos, las experiencias son positivas. En general, los lugares a nivel mundial con mayor dificultad de acceso de la población a los servicios básicos de agua potable y sanidad son lugares en los que no se han realizado este tipo de reformas. Hay numerosas maneras de hacer estas reformas, Colombia las realizó desde el año 1994 con buenos resultados. Los principios de la ley de servicios públicos son claros:

- Garantizar la calidad del bien objeto del servicio público y su disposición final para asegurar el mejoramiento de la calidad de vida de los usuarios.
- Ampliación permanente de la cobertura mediante sistemas que compensen la insuficiencia de la capacidad de pago de los usuarios.
- Atención prioritaria de las necesidades básicas insatisfechas en materia de agua potable y saneamiento básico.
- Prestación continua e ininterrumpida, sin excepción alguna, salvo cuando existan razones de fuerza mayor o caso fortuito o de orden técnico o económico que así lo exijan.
- Prestación eficiente.
- Libertad de competencia y no utilización abusiva de la posición dominante.
- Obtención de economías de escala comprobables.
- Mecanismos que garanticen a los usuarios el acceso a los servicios y su participación en la gestión y fiscalización de su prestación.
- Establecer un régimen tarifario proporcional para los sectores de bajos ingresos de acuerdo con los preceptos de equidad y solidaridad.

La ley consagra los siguientes instrumentos de intervención estatal:

- Promoción y apoyo a personas que presten los servicios públicos.
- Gestión y obtención de recursos para la prestación de servicios.
- Regulación de la prestación de los servicios públicos teniendo en cuenta las características de cada región; fijación de metas de eficiencia, cobertura y calidad, evaluación de las mismas, y definición del régimen tarifario.
- Control y vigilancia de la observancia de las normas y de los planes y programas sobre la materia.
- Organización de sistemas de información, capacitación y asistencia técnica.
- Protección de los recursos naturales.
- Otorgamiento de subsidios a las personas de menores ingresos.
- Estimulo a la inversión de los particulares en los servicios públicos.
- Respeto del principio de neutralidad, a fin de asegurar que no exista ninguna práctica discriminatoria en la prestación de los servicios.

Como resultado se buscan empresas autosuficientes financieramente, eficientes. Los usuarios industriales, comerciales y los estratos altos pagan contribuciones para financiar los subsidios a los estratos más necesitados. Se establecen comisiones de regulación y se asignan las responsabilidades del Estado en sus diferentes niveles.

5.5. Ejercicios

5.5.1. La estructura institucional es un factor fundamental para el sector del agua. Consulte la situación actual del sector en Colombia, compare con el diagnóstico de Fonade [1985] y discuta los cambios que se derivan de la nueva ley del agua.

5.5.2. La estructura de los servicios públicos en Colombia cambió con la ley 142 de 1994. Para algunos analistas los efectos han sido muy positivos, se ha aumentado significativamente la cobertura, las empresas tienen finanzas saneadas, la eficiencia aumento considerablemente y la satisfacción de los usuarios ha aumentado [Montenegro and Rivas, 2005]. A partir del capítulo correspondiente en dicho texto y del panorama global haga un análisis crítico del modelo necesario para lograr las metas del milenio en relación con el agua

5.5.3. El informe del Consejo Mundial del Agua [Cosgrove and Rijsberman, 2000] contiene una cuantificación de la inversión necesaria en recursos hidráulicos para atender el crecimiento de la demanda. Consulte las cifras correspondientes para Colombia y haga un análisis comparativo

5.5.4. La siguiente frase, tomada de Cosgrove and Rijsberman [2000] respecto al mantenimiento y reposición de estructuras de almacenamiento de agua, contiene una inexactitud. Haga la corrección necesaria, consulte la información correspondiente para Colombia, Brasil, Venezuela y Estados Unidos. ¿Cuál es la proyección?: “Sólo para almacenamiento de agua de superficie, hará falta reemplazar cada año un 1 % de la capacidad instalada de 6 000 kilómetros cúbicos por medio de construcciones nuevas o de dragado, a un costo aproximado de \$30 mil millones anuales.”

5.5.5. En la Figura A.1 de la pág. 302 se presenta el caso de una externalidad negativa, digamos que por la contaminación del agua en el procesamiento de pollos. Diseñe un mecanismo de impuestos o subsidios que haga que el mercado se acerque al óptimo social. Justifique su propuesta. Use valores numéricos para ilustrar los pagos, recaudos, utilidades del productor y excedente del consumidor en cada uno de los casos.

5.5.6. Consulte sobre el ahorro de agua mediante tecnologías de alcantarillados secos. Tenga en cuenta los aspectos tecnológicos, económicos, ambientales y culturales. Presente estimativos del impacto de tal transformación tecnológica en ciudades y en zonas rurales.

5.5.7. El uso de agua para el lavado de ropa puede significar unos 10 L por habitante y por día según la tecnología. Revise información sobre diferentes máquinas de lavar, diferentes tecnologías y compare con el método tradicional de lavar a mano. Los detergentes usados para este fin tienen impactos ambientales importantes. Consulte sobre la composición de diferentes variedades y los impactos sobre los cuerpos de agua. En particular considere el papel del fósforo y sus compuestos.

CAPÍTULO 6

Tierra

¿ Se agotó la revolución neolítica, la más importante de todas las transformaciones que ha experimentado la humanidad? Para la mayoría de la humanidad este cambio ocurrió hace unos 12 mil años, coincidió con el final de la última glaciación en el Holoceno, y significó el paso de la recolección de alimentos y el nomadismo hacia las primeras sociedades organizadas, la agricultura, la domesticación de animales y el sedentarismo. Desde entonces el hombre ha realizado avances sorprendentes. Pero las posibilidades de expansión no son ilimitadas. ¿Llegamos al límite? ¿La Tierra nos quedó pequeña? ¿Tienen nuestras instituciones algún mecanismo de provisión para eventual agotamiento?, o por el contrario, ¿hay ciertos bienes, los públicos y los comunes, para los cuales los mecanismos de mercado fracasan en comunicar a los distintos agentes las señales de agotamiento? Lo que es peor, ni siquiera existe algo semejante al gobierno o al Estado para pedirle que regule lo que el mercado no está en capacidad de hacer, porque el asunto es global.

En este capítulo se hace un recorrido rápido por las principales actividades del hombre para abordar la primera parte de estas preguntas. Con la conclusión general de que hay síntomas de agotamiento. En el Capítulo 7 se mirarán los aspectos institucionales.

El diagnóstico descansa sobre el estancamiento e incluso la disminución de la producción per cápita de alimentos (ver Tabla 6.1), la acelerada desaparición de los bosques, de la biodiversidad, y de los peces, el límite al que ha llegado la expansión del área cultivada, el deterioro por erosión y desertificación de los suelos, el agotamiento de la capacidad de la atmósfera para absorber gases de invernadero sin perturbar negativamente el clima. La situación de las ciudades

y el manejo de los materiales contribuyen a tal crisis.

La extrapolación de las tendencias muestra que sencillamente más de lo mismo no es posible. Los hábitos y niveles de consumo de los países desarrollados no son sostenibles para toda la población. Los cálculos para China hacen evidente la magnitud del problema. Hay soluciones, pero no vendrán solas.

6.1. Agricultura

En la última mitad del siglo pasado el área cultivada apenas creció el 10%, mientras que la economía toda se multiplicó por 7 y la población por 2,4. Es cierto que la productividad agrícola se multiplicó por casi 3. Por ejemplo la producción de granos pasó de 631 millones de toneladas a 1835 millones. Por habitante el crecimiento fue del 40% en este período. Pero se está llegando a límites, incluso en los últimos 15 años la producción per cápita ha decrecido [Brown, 2006].

Los antecedentes del aumento de la productividad agropecuaria son espectaculares. En la década de 1960, la revolución verde transformó una grave crisis de alimentos en varios países como India, Pakistán, Filipinas y México, en autosuficiencia. Además de una política económica más racional, que incluía sustentación de precios para amortiguar las fluctuaciones, hubo varios avances tecnológicos de significación, entre ellos el desarrollo de variedades de alta productividad y resistencia a enfermedades. Realmente si se mira con algo de mayor perspectiva, la mejora de variedades tiene una tradición tan antigua como la agricultura pero en estos últimos 50 años fue mayor su impacto. También coincidió con una intensificación de la irrigación (se pasó de 94 a 272 millones de hectáreas bajo riego), de la mecanización, que había empezado desde fines del siglo XIX, del uso de fertilizantes (se pasó de 14 a 137 millones de toneladas) y del control de plagas y malezas con agro-químicos.

Más recientemente (últimos 20 años) la modificación genética ha dado origen a las variedades transgénicas que traen la promesa de una nueva revolución verde. Sin embargo, parece que ya no hay mucho de donde mejorar en productividad porque estamos cerca al límite teórico de eficiencia termodinámica [Sinclair et al., 2002; Evans, 1993].

No hay mucho espacio para aumentar el área cultivada, sólo a costa de los bosques o de zonas marginales menos productivas, con problemas de pendiente, suelos o agua. Al contrario, el crecimiento de las ciudades cada vez invade más zonas agrícolas. La tendencia de los últimos 50 años ha sido a un crecimiento muy lento del área cultivada, a una tasa del 0,3% anual, que difícilmente se va a mantener. Por lo tanto el crecimiento en la producción agrícola que se requiere por el crecimiento de la población definitivamente no vendrá de un

crecimiento extensivo.

Todavía hay lugar, en algunas regiones, a mejoras por disminución de pérdidas de la producción por enfermedades, y por aumento de productividad mediante irrigación y fertilización. Estas zonas están fundamentalmente en Brasil, Argentina y en menor medida en otros países en desarrollo. En particular, hay zonas tropicales con climas muy húmedos o suelos lateríticos o lluvias mal distribuidas en las cuales todavía la tecnología que se ha tratado de emplear es inapropiada.

El panorama general con el agua fue tratado en el Capítulo 5. Como se indicó, en regiones importantes de China, India, Irán, Arabia Saudita, Yemen, Palestina, Israel, el oeste de Norte América y México hay, o está próximo a crearse, una situación de escasez de agua. Estas son zonas de importante crecimiento poblacional y económico, por lo que se espera que igualmente se pueda generar déficit de alimentos.

Por pérdida acelerada de suelo como resultado de la erosión hay amplias zonas en las cuales en lugar de aumentar la productividad va a decaer, o incluso hasta puede haber lugar a abandono de tierras por desertificación o porque se decida que el uso más adecuado es el forestal (ver Sección 6.3).

La expansión económica de China, y el agotamiento del área cultivable, unido a los problemas de sobreexplotación de acuíferos, erosión y desertificación por sobrepastoreo, han llevado a que su producción agrícola se estabilice o incluso empiece a descender. Tal demanda insatisfecha mediante producción local de alimentos tendrá un impacto importante sobre los precios de los granos a nivel mundial. En los próximos años esta demanda nueva puede llegar a 40 millones de toneladas anuales [Brown, 2003].

Algunos cultivos han tenido y tendrán crecimiento mayor que el promedio. Entre ellos está los que se aprovechan como bio-combustibles y el caso de la soya que es una fuente importante de proteína vegetal y aceite. La producción de soya se multiplicó por 11 en los últimos 50 años, comparada con un factor de 3 para los granos. Sin embargo este crecimiento se debe más al área cultivada que a la productividad. La competencia sobre el destino final de algunos cultivos entre energía y alimentos será cada vez más fuerte.

En tales circunstancias, entre las alternativas para mejorar la productividad agrícola están aumentar el número de cosechas por año (en Europa y Norte América hay zonas en las que no se aplica actualmente por motivos económicos), una estrategia más sana para la producción y el consumo de proteínas (ver Sección 6.2), combinación de cosechas (en particular con cultivos o árboles de la familia de las leguminosas que fijan nitrógeno), la conservación de suelos, el control biológico de plagas, la fertilización natural, el reciclaje y aprovechamiento de desperdicios en ganadería mediante ensilaje o compostaje.

Tabla 6.1: Crecimiento y declinación en la producción de alimentos per cápita. Tomada de Brown [2001]

Alimento	Período	Cambio %	Período	Cambio %
Granos	1950–1984	38	1984–2000	-11
Carne	1950–1972	44	1972–2000	-15
Comida mar	1950–1988	112	1988–1998	-17

6.2. Ganadería

El área dedicada a la ganadería es aproximadamente el doble que el área cultivada. Entre vacas, búfalos, cerdos, ovejas y cabras hay unos 4 200 millones de animales, que tienen un sistema digestivo complejo (algunos son rumiantes), lo que les permite aprovechar material vegetal que de otra manera no tendría uso. La carne, leche, lana, cuero y demás derivados son fuente de sustento para millones. Las aves de corral son también una importante fuente de proteína que se incluirá en esta sección. A nivel mundial el 38 % del consumo de carne es de cerdo, el 27 % de res y el 28 % de pollo.

En algunos casos el ganado se tiene en establos, pero en mayor medida está en potreros. Se estima que a nivel mundial la mitad de la tierra dedicada a la ganadería está moderadamente degradada y el 5 % severamente degradada. En África el problema de sobrepastoreo es más visible, donde la demanda de la ganadería excede la capacidad de los ecosistemas. En 1950 había 273 millones de cabezas y 238 millones de habitantes; hoy hay 725 millones de cabezas de ganado y 887 millones de personas. China tiene un problema semejante o incluso más grave. Después de las reformas económicas que entregaron el campo a la economía familiar privada, la población ganadera creció exponencialmente. Hay unos 107 millones de cabezas de ganado vacuno y 340 millones de ovejas y cabras. Estos animales están consumiendo la vegetación en las regiones norte y oeste y convirtiendo la tierra en desiertos [FAO, 1995]. Se estima que Nigeria, el país más populoso de África, pierde cada año 351 000 hectáreas de pasturas por desertificación. En los últimos 50 años su población pasó de 33 a 132 millones, se multiplicó por 4; pero el número de cabezas de ganado pasó de 6 a 66 millones, se multiplicó por 11. El sobrepastoreo está deteriorando y desertificando la tierra y la población continúa creciendo a una de las tasas más altas, se espera que llegue a 260 millones de habitantes en el año 2050.

Una de las medidas que puede ayudar a la solución de estos problemas y además contribuir a la solución del problema del agua es la reestructuración de la economía de la proteína. El ganado vacuno requiere 7 kg de comida por

kg de carne en pie, la porcicultura sólo 4, la avicultura 2 y la pesca menos de 2. El cambio en la dieta alimenticia hacia mayor participación de las especies más eficientes puede ayudar significativamente.

6.3. Erosión

La delgada capa de suelo que cubre la superficie del planeta es probablemente el recurso más valioso con el que contamos. Su formación ha tardado cientos, miles de años, y es el resultado de procesos geológicos de meteorización de las rocas, actividad de microorganismos, interacción con las plantas y animales. En condiciones naturales, la tasa de formación de suelos excede la de erosión, lo que ha permitido la acumulación. No en todas partes los suelos son iguales, hay desiertos, hay zonas con decenas de centímetros de espesor y otras con unos cuantos milímetros. La actividad humana ha perturbado este precioso recurso, y en algunas zonas ha desencadenado procesos de pérdida irreversible, erosión acelerada. Tanto los climas áridos como los muy húmedos son más susceptibles a la erosión. En los primeros la vegetación no alcanza a formar una capa protectora adecuada y el suelo queda expuesto a la acción del sol, el agua y el viento. En general los suelos de estas zonas tienden a ser más arenosos y por tanto más vulnerables a la acción erosiva del viento. En los climas muy húmedos son frecuentes eventos muy intensos de precipitación que saturan los suelos, que se vuelven fluidos y producen grandes deslizamientos. También la acción de la lluvia desgarras las partículas cuando encuentra suelo descubierto. La escorrentía que acompaña a los aguaceros intensos, transporta estos materiales a las corrientes, ríos y quebradas. Además, el flujo permanente del agua por el interior de los suelos disuelve y transporta los constituyentes más solubles del suelo. El equilibrio entre estas tasas de transporte y la velocidad a la cual se descomponen las rocas y se producen los compuestos orgánicos determina la composición de los suelos, sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En alguna medida el estudio de los suelos se ha separado artificialmente en disciplinas. Los agrónomos, los geólogos, los ingenieros civiles de suelos, los hidrólogos, los químicos, los biólogos tienen cada uno su interés. Incluso la definición de suelo son diferentes para cada disciplina. El diálogo necesario entre ellas representa muy bien la necesidad de la nueva ciencia de la Tierra.

Para algunos, el recurso suelo es uno de los que está en peligro por la acción humana [Brown, 2006]. Los ejemplos de las grandes cuencas polvorrientas (dust bowl en Inglés), notorio en las películas de cine del oeste americano, y que en realidad se presentó en las grandes planicies en los años treinta. Pero que también ha ocurrido en los años 1960's en la Unión Soviética después de la expansión agrícola hacia las tierras vírgenes, está ocurriendo ahora en el norte de China y en la región del Sahel en África. Estas cuencas polvorrientas co-

rresponden a un patrón de deforestación, sobre-pastoreo, expansión agrícola hacia tierras marginales y semiáridas mediante prácticas no sostenibles, abandono de la agricultura, erosión acelerada y desertificación [Youlin et al., 2002]. La frecuencia de las tormentas de polvo ha aumentado en China y en África; en Mauritania, pasó de 2 al año en 1960, a 80 actualmente. Esto ha sido muy notorio para Japón y Corea que las sufren. También se ha incrementado notablemente la erosión hídrica en Pakistán y Etiopía.

Los procesos de desertificación en China, Asia central y África se han vuelto comunes. Estas regiones son muy pobladas, alcanzando casi 4 mil millones de habitantes. China está perdiendo del orden de 1 500 kilómetros cuadrados al año desde 1950 y se cree que hoy esta cifra puede llegar hasta el doble [Hongchang, 1999]. En los últimos 50 años se han abandonado por este proceso más de 24 000 poblados en el norte y el oeste de China. Un reporte de 2002 de la embajada americana en China describe la expansión unificación de los desiertos del norte y el oeste como un proceso de consolidación de un único gran desierto que incluye a Mongolia Central, las provincias de Gansu, Xinjiang, Taklimakan y Kumtag.

Las lecciones de la cuenca polvorienta americana de los años treinta fueron aprendidas. De allí nació el Servicio de Conservación de Suelos y la mayoría de los conocimientos y técnicas de conservación provienen de esta institución. Su aplicación para las zonas semi-áridas depende fundamentalmente de medidas gubernamentales y económicas. Para las zonas tropicales sí es necesario el desarrollo de prácticas agrícolas adecuadas a las condiciones climáticas.

6.4. Deforestación

El bienestar de la humanidad está ligado a la salud de los bosques y selvas. Estos ecosistemas prestan muy importantes servicios, purifican el agua, controlan inundaciones, regulan el clima, producen oxígeno y capturan CO₂ atmosférico, desarrollan y conservan los suelos, son soporte para la biodiversidad, proporcionan fibra, plantas medicinales, maderas, alimentos. Cientos de culturas aborígenes y millones de campesinos pobres viven en ellos. Proporcionan paisaje, y turismo. A pesar de estos servicios, están desapareciendo más rápido que siempre y lo más grave es que a cambio ni la humanidad, ni los campesinos pobres, ni los aborígenes están consiguiendo algo. Hay un círculo vicioso de colonización que trae beneficios sólo a unos cuantos especuladores con droga y madera. Incluso los fenómenos económicos lejanos, como la aparición de la enfermedad de las vacas locas, crea presión sobre los bosques. Nepstad et al. [2002] es una fuente importante para esta sección.

Se estima que había $3,9 \times 10^9$ ha de bosques en el año 2000, lo que equivale al

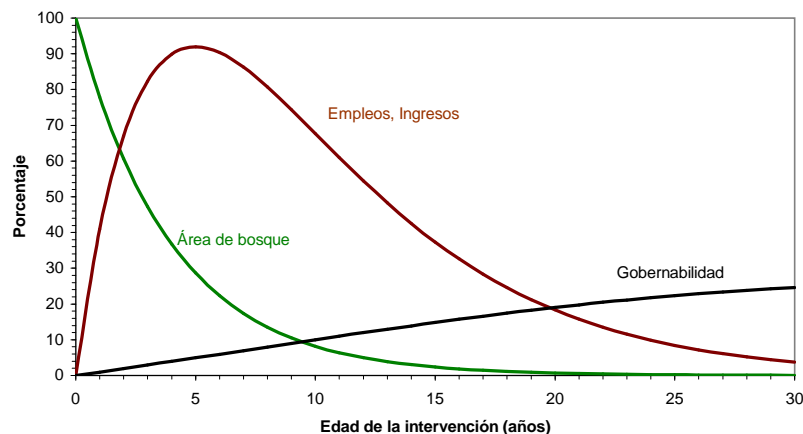


Figura 6.1: Secuencia típica de la deforestación, expansión económica y desarrollo de la gobernabilidad en la colonización de zonas vírgenes. Adaptado de Nepstad et al. [2002]

30 % de la superficie terrestre. Entre el año 1990 y el año 2000 se deforestaron 94×10^6 ha en los países en desarrollo y se reforestaron 36×10^6 ha en los países desarrollados. La producción de madera en 1999 se estima en $3,28 \times 10^9$ m³. Esto equivale a 0,5 m³ por habitante. El 53 % de esto se consume como leña, lo que representa el 7 % de la energía total aunque para algunos países puede ser hasta el 80 %, pero para los países industrializados es menos del 3 %. Para la producción de papel se destina un tercio del total (para un promedio de 52 kg por persona en 1999) del consumo de madera. El resto se dedica a construcción de muebles y a la construcción. Aunque la utilización de la madera para leña es crítica en regiones como África y aunque la extracción de maderas finas es uno de los primeros pasos en el proceso de deforestación, el problema fundamental está en el círculo vicioso de la colonización.

Claramente es necesaria una estrategia de manejo de los bosques más eficiente que la actual que ha demostrado su insuficiencia. Lo primero es reconocer que el problema es global, lo segundo es organizar el poder para hacer cumplir las medidas que se tomen. En particular parece necesario ejercer un control sobre las grandes compañías madereras y agrícolas para que empleen prácticas sostenibles, buscar mecanismos para dar incentivos a los gobiernos que ejercen un control ambiental adecuado y recompensar a los campesinos pobres por los costos en que incurran por conservar los recursos de acuerdo al interés global de la sociedad.

Los bosques del planeta están desapareciendo a medida que un patrón predecible de expansión de la frontera se repite. Primero llegan las carreteras u otros

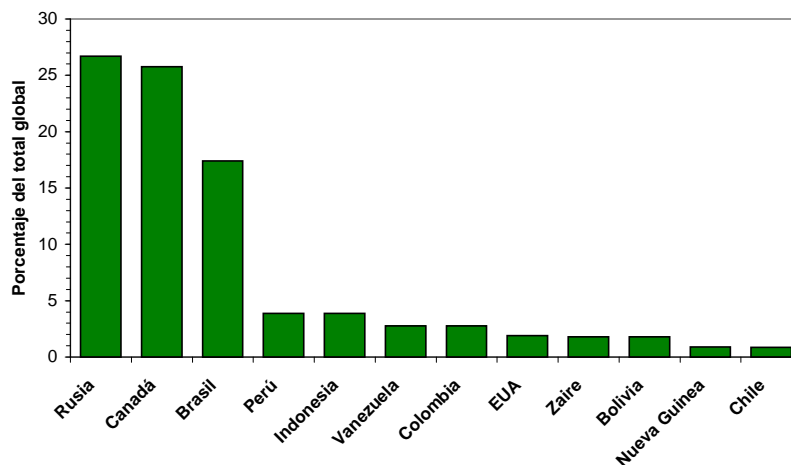


Figura 6.2: Países con mayor frontera forestal. Adaptado de Nepstad et al. [2002]

medios de transporte a las zonas aisladas. Estas redes de comunicación, motivadas por interés económico o geopolítico, inician la expansión de la frontera. La fase inicial, el boom, es rápida, totalmente sin cuidado y muy a menudo violenta. La especulación con la tierra, la extracción de la madera, la caza, la extracción de minerales y la pesca generan riqueza, poder y conflicto que sobrepasa la capacidad de las autoridades y de la sociedad civil para gobernar, que para empezar es bastante débil.

La gobernabilidad en las zonas de colonización y el impacto negativo en el medio siguen círculos viciosos descritos por Nepstad et al. [2002]. Los indígenas, los colonos de subsistencia y la gente seguidora de las normas generalmente pierden la guerra por los recursos naturales. La tierra desmontada se abandona al poco tiempo porque la explotación se apoya en modelos no apropiados para el medio, y la deforestación crecen rápidamente. La capacidad de control del Estado y la oferta de ciencia y tecnología adecuada crece muy lentamente. Sólo alcanza a ser significativa cuando la degradación ya es alta, los bosques prácticamente desaparecen y los beneficios de largo plazo en empleo e ingresos son pocos. Por lo que se desencadena una nueva ola de colonización, más deforestación y ningún bienestar para los colonos. La Figura 6.1 presenta un esquema de este círculo vicioso.

Es necesario romper el círculo, lo cual sólo se logra con gobernabilidad que proviene de la interacción de diversos actores, estado-comunidades locales-instituciones, fundada sobre una noción de desarrollo sostenible, un adecuado conocimiento del medio y en el diseño de tecnologías avanzadas para la sostenibilidad, que requieren de una base científica pero también, de participación

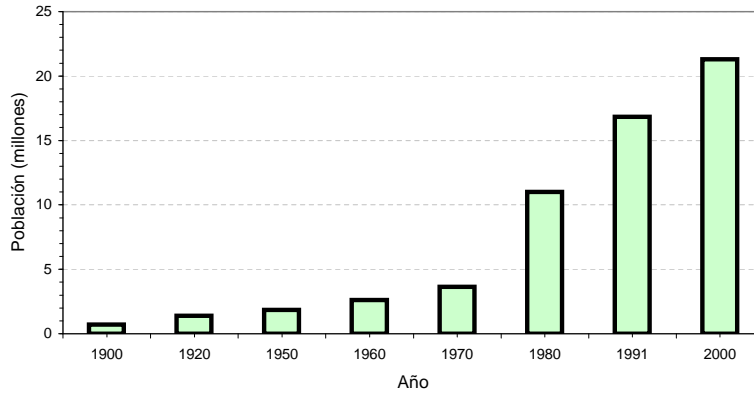


Figura 6.3: Crecimiento de la población en la Amazonia brasileira. Datos de IBGE

social y estatal.

La expansión de la frontera finalizó en casi todas partes. La mayor parte de los bosques intactos queda en unos cuantos países, entre Brasil, Rusia y Canadá tienen más del 60 %. La Figura 6.2 muestra la información como proporción del total de bosque que subsiste. Hoy en día la deforestación está concentrada fundamentalmente en los trópicos. Según las últimas estimaciones cada año se limpian 15 millones de hectáreas de selva pluvial [Nepstad et al., 2002]. En el proceso por quema se emiten a la atmósfera unos 1,6 Pg de carbono por año, aproximadamente un cuarto de la emisión total (ver Tabla 3.1 de la pág. 81).

Para poner una dimensión a la magnitud del problema de la emisión de carbono vale la pena mirar el caso del evento ENSO de 1997–1998. En Indonesia únicamente, se estima que por incendios forestales las emisiones fueron de 1 Pg de carbono, mientras que con los ingentes esfuerzos del Protocolo de Kyoto, en caso de que se cumpla, la reducción anual que se aspira obtener es sólo la mitad de esa cifra.

Este cambio en la cobertura tiene efectos sobre el clima local y regional y es una de las causas fundamentales para la pérdida de biodiversidad. Los cambios en el clima pueden adquirir dimensión para afectar el clima global. Estos efectos aparecen a tasas diferentes y de alguna manera complicada pueden desencadenar mecanismos de retroalimentación. El carbono emitido depende linealmente del área deforestada. Los efectos sobre la lluvia, evaporación, temperatura y caudal de los ríos pueden cambiar con el tiempo, como se discutirá en seguida. El número de especies amenazado aumenta rápidamente con la intervención sobre el bosque después de que se sobrepasa el 70 %.

La ocupación de la Amazonia es reciente. Desde la llegada de los europeos

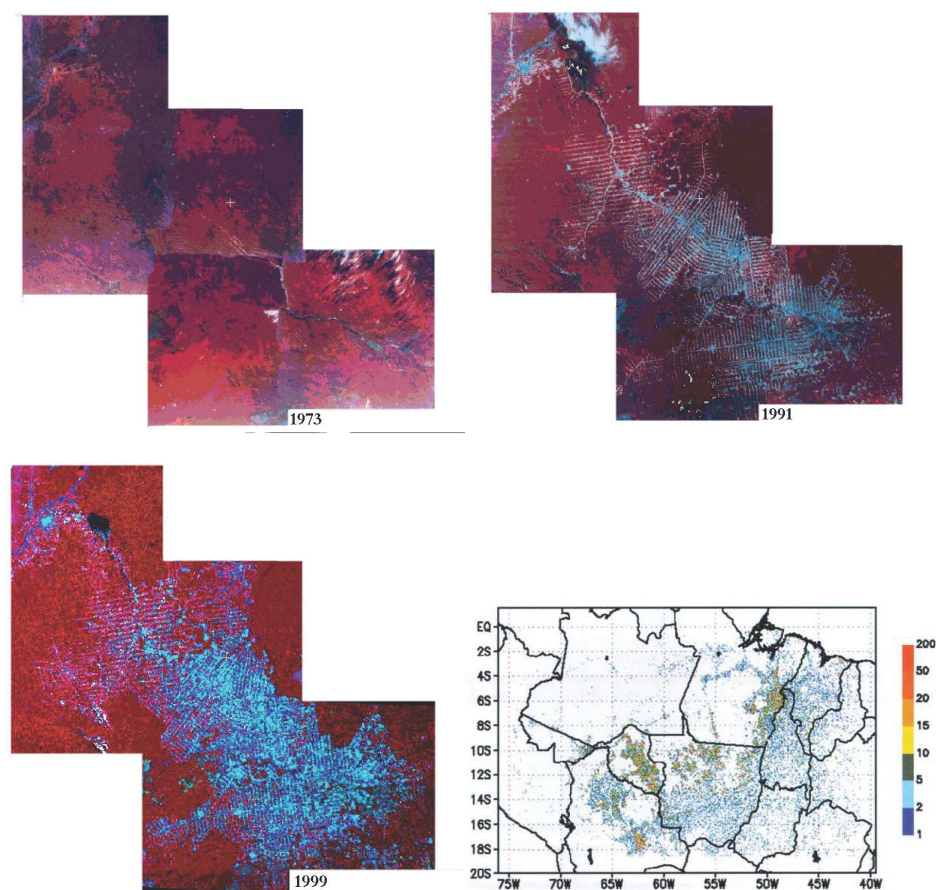


Figura 6.4: Avance de la deforestación en la Amazonia brasilera (Rondonia) vista desde imágenes de satélite en 1973, 1991 y 1999. En el cuadro inferior a la derecha, quemas forestales entre junio y octubre de 1995. Datos de la Universidad de Wisconsin en Madison

en 1500, y a pesar de la fundación de Manaus en 1669, y del boom de la extracción del caucho a finales del siglo XIX, el cambio en el uso del suelo y el crecimiento de la población fue despreciable hasta 1960 (ver Figura 6.3). Hubo sin embargo un impacto muy negativo sobre la población aborigen por efecto de la colonización y la explotación del caucho. En los últimos 40 años, la deforestación ha sido grande, se estima un total de cerca de 600 000 km², es decir, un 15% del total, a tasas de hasta 25 000 km² por año. Los planes del gobierno brasilero para integrar la región mediante una red de carreteras han producido un crecimiento acelerado de la población que ya es mayor de los 20

millones, aunque concentrada fundamentalmente en ciudades y pueblos.

Hay olas de colonización movidas por extracción destructiva de madera, quemas, ganadería subsidiada, y agricultura de soya de muy baja tecnología. En algunas regiones hay fiebre minera. En otras, la coca es el principal motor de la colonización y la deforestación. Han aparecido puertos de exportación de soya sobre el río y se ha expandido la producción de carne y de palma aceitera. La quema es el mecanismo fundamental de destrucción del bosque. La Figura 6.4 muestra el patrón de deforestación visto desde satélite en la región de Rondonia y la detección de incendios mediante imágenes remotas. Es clara la influencia de las carreteras en el patrón de deforestación [Salati and Vose, 1984; FAO, 2001].

Además de la cuenca amazónica, en el Congo y en Borneo hay deforestación a gran escala. La expansión del cultivo de palma ha llevado a un crecimiento anual del 10% en el área cultivada, a expensas de la selva húmeda en Malasia e Indonesia. La demanda del aceite de palma va a crecer por la generalización de su uso para la fabricación de biodiesel. En Madagascar también hay deforestación acelerada.

Las compañías madereras no han mostrado ningún interés por una explotación sostenible. Simplemente agotan el recurso y se van. Filipinas, Nigeria y otros países del Sureste Asiático y África, que una vez fueron exportadores de madera, hoy son importadores netos [Sizer and Plouvier, 2000].

Los efectos hidrológicos y climáticos de la deforestación van desde lo local y regional hasta lo global. Además, existen importantes efectos de retro-alimentación que es necesario tener en cuenta. Para ilustrar los efectos de la deforestación sobre las variables hidrológicas, considérese la ecuación de conservación de masa dentro de una columna de suelo-atmósfera, que bien podría ser una cuenca hidrográfica, una región o un continente [Poveda and Mesa, 1995]. La ecuación de balance de agua corresponde a una simple contabilidad de entradas y salidas a un volumen de control (Figura 6.5). La ecuación para la atmósfera es,

$$Q + E - P = \frac{dW}{dt} . \quad (6.1)$$

Para la columna de suelo,

$$P - E - R = \frac{dS}{dt} , \quad (6.2)$$

y para la atmósfera y el suelo combinados es

$$Q - R = \frac{d(W + S)}{dt} . \quad (6.3)$$

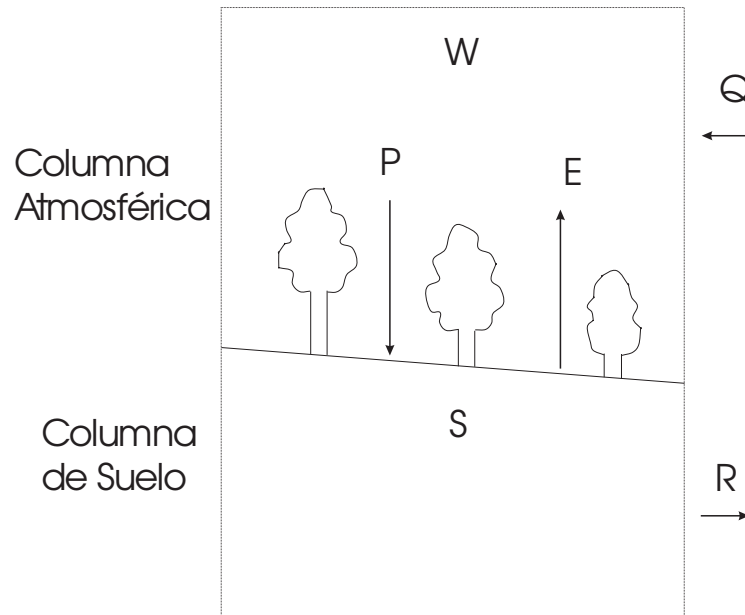


Figura 6.5: Esquema del volumen de control para ecuación del balance hídrico

El almacenamiento de agua en la atmósfera está representado por W , la llamada agua precipitable, en unidades de longitud (volumen por unidad de área); S es el almacenamiento de agua en el suelo, también en unidades de longitud; P es la precipitación; E es la evaporación (incluye la transpiración); Q es el total del flujo neto de humedad a través de la frontera en la atmósfera; y R es el total del flujo neto de agua hacia afuera de la columna de suelo, constituido por la escorrentía superficial y la subterránea. Tanto P , E , Q como R están expresados en unidades de velocidad, es decir flujo o caudal por unidad de área y corresponden a promedios espaciales sobre el volumen de control en cuestión para el caso de P y E . La atmósfera recibe humedad proveniente de la evapotranspiración que se combina con el influjo lateral producto del transporte de aire húmedo por los vientos. Eventualmente, la humedad se condensa y cae en forma de precipitación. La resultante de estos procesos es el cambio en el estado de humedad atmosférica. La Ecuación 6.1 corresponde a la representación de tal balance. De manera semejante se explican las ecuaciones 6.2 y 6.3.

Para el caso de la columna combinada de atmósfera y suelo la precipitación y la evaporación no aparecen por ser flujos internos. Otra manera de ver la misma es como la suma de las ecuaciones 6.1 y 6.2. Para profundizar un poco más en las consecuencias de las ecuaciones 6.1 y 6.2 del balance de agua se considera la

integración sobre un intervalo de tiempo largo (varias décadas), de tal manera que los cambios en las cantidades almacenadas W y S sean despreciables. En tal caso se tiene que el promedio de largo plazo del influjo atmosférico neto Q debe ser igual al promedio de largo plazo de la escorrentía neta R y que ambos son iguales a la diferencia entre los respectivos promedios de precipitación P y evaporación E . Es decir, $Q = R = P - E$, para los promedios de largo plazo.

El cambio en la cobertura vegetal que resulta de la deforestación se va a reflejar en posibles cambios en estas variables, que no son libres sino que deben cumplir estas ecuaciones. En particular vamos a argumentar que la evaporación disminuye. Una conclusión simplista pudiera ser que la escorrentía aumenta. Lo cual sería una consecuencia clara si la precipitación permaneciera constante. De hecho, hay casos de estudio en pequeñas cuencas en los que el caudal ha aumentado después de una deforestación. Pero, como resultado general se pueden esperar cambios en el resto de variables, por ejemplo en la precipitación, la escorrentía, o en la humedad del suelo, o en ambas. Es decir, la situación no es tan elemental.

Para aportar otro elemento adicional al análisis consideremos el proceso de reciclado de precipitación. La siguiente ecuación, originalmente planteada por Budyko [1974; pág. 240] se obtiene de considerar el balance en la atmósfera y la hipótesis de mezcla perfecta entre las moléculas de agua provenientes de influjo externo y las provenientes de evaporación local. Si llamamos u , a la velocidad media del influjo de humedad a la columna atmosférica, es posible establecer la relación de precipitación reciclada (proveniente de la evapotranspiración interna) dentro de una región de escala horizontal L , mediante

$$\frac{P_m}{P} = \frac{1}{1 + 2uW/(EL)}, \quad (6.4)$$

en donde P_m es la precipitación que tiene origen en la evapotranspiración dentro de la misma columna. Las estimaciones de la relación P_m/P para la cuenca del Amazonas varían entre el 50% y el 5% [Shuttleworth, 1988; Brubaker et al., 1993; Eltahir and Bras, 1996; Trenberth, 1999; Vuille et al., 2003]. La ecuación 6.4 pone de presente que la precipitación es una función del estado de humedad del suelo, por la vía de la evapotranspiración. Así, una reducción de la evapotranspiración por causa de los cambios en la cobertura vegetal y deforestación se puede manifestar en una reducción en la precipitación sobre la región y en una alteración de su distribución espacio-temporal.

Para ilustrar la cadena de interacciones desencadenada por la deforestación, sigamos el siguiente razonamiento energético, que como se dijo es apenas uno de los problemas involucrados. El cambio de cobertura implica un cambio en el albedo superficial. El bosque húmedo tropical tiene un bajo albedo, reflejando apenas del orden del 12% de la radiación solar incidente (onda corta).

Las tierras dedicadas al pastoreo tienen albedos mucho más altos, del orden del 22 %. Bajo iguales condiciones de insolación el bosque tiene más energía radiativa disponible. El equilibrio energético se logra mediante la emisión de radiación de onda larga (proporcional a la cuarta potencia de la temperatura), a la entrega de calor latente a la atmósfera por evapotranspiración y a la conducción de calor sensible a la atmósfera.

La selva tropical se caracteriza por altas tasas de evapotranspiración, mientras que los pastos tienen menores tasas de evapotranspiración (relación 3 a 2 aproximadamente). La ecuación de balance energético por sí sola no permite establecer cómo se distribuye entre las distintas componentes la disminución en la energía disponible producida por la deforestación, en principio incluso alguna de ellas podría aumentar. De hecho, la disminución en la evapotranspiración no sólo compensa la disminución en la energía radiativa disponible por aumento del albedo sino que lleva a que el balance se obtenga con aumento de la emisión de onda larga asociada a un aumento de temperatura superficial. Con la deforestación una mayor parte de la energía radiativa que viene del sol se gasta calentando en vez de evaporando.

Además la deforestación produce cambios en la nubosidad y la humedad atmosférica como consecuencia de la disminución en la evaporación. Ambos cambios tienen repercusiones en el balance energético. A menor nubosidad se espera mayor cantidad de radiación solar alcanzando la superficie. Sin embargo la disminución en la humedad trae consigo una reducción en el efecto invernadero, lo que puede compensar el efecto anterior. En las zonas tropicales estos dos factores se pueden compensar.

El cambio de cobertura trae consigo adicionalmente un cambio significativo en la rugosidad aerodinámica. La altura de los árboles en la selva puede alcanzar unos 35 metros mientras que los pastos y los potreros difícilmente tienen alturas superiores a los 35 cm. El efecto más importante de la rugosidad está sobre la turbulencia en la capa límite planetaria. La intensidad de la turbulencia afecta la evaporación y el flujo de calor sensible. En general a mayor intensidad de la turbulencia mayores tasas de transporte de temperatura y humedad.

También es necesario considerar el efecto de la rugosidad sobre la estabilidad vertical del aire húmedo. La mayor rugosidad significa que el espesor de la capa límite es mayor, que hay una mejor mezcla al interior de la capa y que una fracción mayor de la energía del flujo principal se gasta en vórtices y movimiento desordenado, incluyendo corrientes ascendentes. Las mayores tasas de evapotranspiración son también fuente continua de humedad superficial.

Este análisis indica que en la zona ecuatorial la deforestación tiende a disminuir condiciones favorables para la precipitación.

Otro efecto importante de la vegetación tiene que ver con los suelos y el almacenamiento de agua. El bosque húmedo tropical es más eficiente para almacenar

agua, las raíces de un pastizal difícilmente alcanzan a extraer agua por debajo de los 50 cm de suelo, mientras que las raíces de los árboles pueden penetrar varios metros. Simultáneamente los árboles mismos son muy buenos interceptores de las gotas de lluvia, pueden almacenar en las hojas y demás depresiones hasta el 12 % de la precipitación, la evaporación de esta agua ayuda a reducir temperatura, pero lo que es más importante, protege el suelo del impacto de las gotas y su efecto erosivo. El suelo se protege además de la radiación solar directa. La gran cantidad de materia orgánica en descomposición produce una capa superficial bastante permeable, que favorece la infiltración. Este efecto es importante desde el punto de vista hidrológico, pues la escorrentía de las cuencas con cobertura de selva tropical tiende a ser más regulada, con mayores caudales mínimos y menores caudales máximos, en comparación con una cuenca deforestada.

Estudios a nivel local han demostrado que la deforestación puede traer disminución de la lluvia. En el área del Canal de Panamá se ha detectado una disminución entre 6 y 10 mm/año en las lluvias de regiones sometidas a deforestación desde principios del siglo [Poveda and Mesa, 1995]. Situaciones similares se han reportado en Costa de Marfil, en varias regiones de la India y en China. En algunas regiones de Malasia se ha encontrado no sólo una disminución de la lluvia asociada a la disminución de los bosques, sino que se ha modificado su distribución espacio-temporal.

Sin embargo es difícil extrapolar a partir de estos datos cuáles pueden ser los cambios que se pueden esperar por la pérdida de grandes áreas de la selva amazónica. Un cambio de gran escala en el uso de la tierra de bosque tropical lluvioso a cultivos bajos, reduce la evapotranspiración y, consecuentemente, la precipitación local. Los llamados modelos de circulación general sugieren una reducción entre el 20 % al 30 % en la precipitación sobre la cuenca (con reducciones de hasta 400 mm por año en la zona de Colombia) [Shukla et al., 1990]. También se encontraron reducciones de hasta el 50 % en la evapotranspiración en áreas de gran pluviosidad. Y la escorrentía superficial mostró reducciones entre el 10 % y el 20 % para la cuenca y aumento de la temperatura hasta de 3 °C. Estos resultados también indican que se pueden presentar cambios importantes en la distribución espacio-temporal de las variables hidrológicas y un incremento en la duración de la temporada de verano. Además, se detectan posibles reducciones en la infiltración debidas a compactación del suelo y una disminución en la disponibilidad de agua para los cultivos.

Un mecanismo importante de retroalimentación de la tierra a la atmósfera tiene que ver con la partición de la radiación solar incidente entre calor sensible y calor latente. Esta partición es controlada por la evapotranspiración superficial en una forma compleja. Además de este mecanismo de retroalimentación climático, hay otros de más largo plazo con relación al tipo de vegetación que

se establece y se estabiliza en una región, que claramente depende del clima. Pero a su vez, como acabamos de argumentar, la vegetación tiene la capacidad de afectar el albedo, la evaporación, la temperatura, la precipitación, la humedad atmosférica y del suelo, prácticamente todas las variables climáticas. En la naturaleza estos mecanismos han operado por siglos y han producido el clima y la distribución de los ecosistemas que el hombre encontró. Hay evidencias de que cambios climáticos naturales han estado acompañados por cambios en la distribución de la vegetación. Para el caso de la selva amazónica varios estudios indican que estos mecanismos de retroalimentación producen dos estados de equilibrio estable, separados por un estado inestable. Uno de los estados corresponde a la selva pluvial y el otro a una sabana. Los resultados de tal estudio numérico indican que la intervención humana por deforestación puede empujar el sistema hacia este último estado [Alcock, 2003].

Aunque la tendencia tiene una fuerza difícil de contener, existe todavía esperanza de que se pueda revertir. En diciembre de 2004 el gobierno de Filipinas tomó medidas drásticas contra la deforestación y la extracción ilegal de madera después de una serie de inundaciones y derrumbes que dejaron más de 340 muertos. El diagnóstico fue que la deforestación había contribuido a esta tragedia. Algo semejante había ocurrido en China después de las inundaciones del río Yangtze en agosto de 1998. Igualmente en Mozambique después de las inundaciones del año 2000 en el río Limpopo. También tienen medidas semejantes Sri Lanka, Tailandia, Vietnam. A continuación se presentan algunas de las propuestas presentadas por Nepstad [2005]; WCFSD [1999].

Los mayores obstáculos para avanzar hacia soluciones reales al problema de la deforestación provienen de la diversidad de ecosistemas, de dueños, de responsables, de leyes y de normas; los asuntos de soberanía nacional; la valoración inadecuada de los servicios que prestan los bosques y selvas y la debilidad institucional. Cualquier acción efectiva debe fortalecer la capacidad de gobernar antes o al menos de manera simultánea con el inicio del proceso de expansión de la frontera, para que la explotación sea sostenible y no inapropiada y de corto plazo. Debe haber mecanismos económicos para castigar el uso inadecuado y la destrucción de los bosque y para premiar el uso sostenible y la protección. Las maneras más comunes que se han encontrado para esto son mediante el desarrollo y la aplicación de legislación ambiental adecuada y simultáneamente con mecanismos de mercado.

El sistema de información es fundamental, las imágenes de satélite y los sistemas de información geográficos son instrumentos de manejo imprescindibles hoy en día para el manejo sostenible del territorio. Las certificaciones ambientales de productos son una manera de proporcionar incentivos. Se deben reforzar las organizaciones de campesinos pobres y colonos y contribuir a potenciar su capacidad técnica, institucional y económica. Debe haber mayor conciencia y

participación en asuntos políticos relacionados con el tema por parte de todas las organizaciones civiles en todo el mundo, en particular en las ciudades de los países en vías de desarrollo directamente afectados, pero además en los países consumidores. Este compromiso con el tema se debe reflejar en acciones concretas contra las compañías que destruyen los bosques y en apoyo económico para los campesinos pobres y colonos comprometidos con la conservación.

Las reglas de juego del comercio internacional deben ser de mercado libre, sin subsidios que signifiquen competencia desleal con la agricultura de los países en desarrollo para no incentivar la colonización que resulta de la pérdida de empleos agrícolas. En el caso colombiano es necesario resaltar el papel negativo para los bosques de los cultivos ilícitos y de las medidas de control (fumigaciones). Este asunto requiere soluciones más imaginativas y eficaces.

Para hacer posible el desarrollo sostenible en los bosques pluviales tropicales es necesario el desarrollo de ciencia y tecnología apropiada. Esto pasa por cooperación internacional y la consolidación de comunidades e instituciones científicas en los países interesados. Se estima que se requieren cerca de 3 000 científicos lo que puede costar unos \$300 millones de dólares al año. Cantidad alta pero en el rango de las posibilidades, sobre todo si hay cooperación, rendimiento de cuentas y resultados.

6.5. Biodiversidad

Una muy breve mención de este problema que merecería un más completo tratamiento. La desaparición de las especies tiene impacto sobre la humanidad y el resto de especies que sobrevivan. La vida es una red con muchas relaciones. Cada especie juega su papel, presta su servicio, en la polinización, la dispersión de semillas, el control de la población de otras especies, el ciclo de nutrientes. Las plantas son nicho para muchas especies. La destrucción del hábitat afecta a todas las especies, principalmente por deforestación. Algunos comparan la quema de la biblioteca genética de la selva Amazónica con la quema de la biblioteca de Alejandría.

El porcentaje de especies mamíferos, y peces que son vulnerables o están en riesgo inmediato de extinción llega al 23 % y 46 % respectivamente. Un total de 1 100 especies de mamíferos está en riesgo, entre ellos los primates (240 especies) son los de mayor dificultad. En una generación de humanos, en el Congo la población de chimpancés enanos (bonobos) pasó de 100 000 a 3 000, una reducción del 97 %. De las 9 775 especies de pájaros, 70 % están declinando en población y 1 212 están en riesgo de extinción por pérdida del hábitat, en algunos casos por pesticidas. Del total de especies de peces de agua dulce de Norte América, el 37 % está extinto o en riesgo, y es peor la situación en

Europa donde 80 de 193 especies está en riesgo. La tortuga de espalda de cuero en Costa Rica pasó de 1 367 a 117 hembras en Playa Grande. El 35 % de los corales en el Caribe están amenazados, lo que pone en riesgo muchas especies [IUCN, 2004].

6.6. Pesca

En los últimos 50 años la captura de peces se multiplicó por 5, pero si se mira con detenimiento se aprecia que desde 1985 hay un declive. Varios estudios demuestran que ha disminuido sistemáticamente la talla y el número trófico, todos síntomas inequívocos de agotamiento. El mar se ha visto como una fuente inagotable de recursos, lo que ha llevado a sobreexplotación. La convención de las Naciones Unidas sobre el mar de 1982, o ley de las 200 millas, resolvió años de conflictos pero generó una dinámica de sobreexplotación y dejó en los países la responsabilidad del manejo, pero ninguno ha cumplido efectivamente. Para evitar la entrada de flotas extranjeras los gobiernos subsidiaron las propias. A esto se sumó el desarrollo en la tecnología, la capacidad de avistar el recurso desde el espacio, la captura no deseada por redes muy finas y el abuso de las redes de arrastre, factores que explican el incremento en la captura, pero también el agotamiento. Se estima por ejemplo que el efecto de las redes de arrastre sobre el fondo marino en las plataformas continentales equivale a una “deforestación submarina” 10 veces mayor que la que ha ocurrido sobre superficie. Sobre tierra el manejo inadecuado de ríos, humedales, manglares y estuarios es también parte del problema. Nuevamente estamos ante un bien común e internacional que no es eficientemente manejado por los mecanismos del mercado.

En el fondo del asunto hay una competencia entre el presente y el futuro. Las flotas comerciales crecieron siguiendo una tendencia que no se puede mantener. Las voces de alerta de los biólogos marinos no se han tenido en cuenta. Por el contrario, los subsidios gubernamentales han sido uno de los motores de la expansión. Es cierto que algunos gobiernos ya han iniciado medidas de protección. Pero hay sin embargo grandes dificultades con los acuerdos de reducción. Por ejemplo, la comunidad económica europea en 1997 impuso una reducción del 20 % para las especies más sobre-explotadas y del 30 % para las especies en peligro. En 2001 tuvieron que imponer prohibiciones totales. Y hay mecanismo de expansión de la escasez. Las flotas europeas se han trasladado a África, han comprado licencias y compiten con las flotas japonesas, rusas y Chinas. El problema se ha trasladado.

La captura de peces en el mar pasó de 19 millones de toneladas en 1950 a un record de 93 millones in 1997. Este crecimiento es a una tasa casi el doble de

la correspondiente en la población. Como resultado, el suministro de comida de origen marino por persona pasó de 7 kilogramos en 1950 a 17 kilogramos en 1988. Pero desde entonces ha caído a 14.

Varios estudios han puesto en evidencia el agotamiento de la pesca. Por ejemplo, Myers and Worm [2003] muestra que el 90% de los grandes peces ha desaparecido o está en peligro de extinción, en los últimos 50 años, entre ellos el marlin azul gigante, el atún azul, el esturión del mar Caspio, el bacalao del Antártico, el mero tropical, para mencionar los más famosos. Pauly and Watson [2003] han calculado el descenso del número trófico de los peces capturados y puesto en evidencia la sobreexplotación. En términos simples, el número trófico de una especie cuenta cuántas especies están por debajo de ella en la cadena alimenticia. Los productores primarios tienen número trófico 0, los que se alimentan exclusivamente de productores primarios tienen número trófico 1 y así sucesivamente. Sólo que la dieta normal de un predador incluye diferentes especies, haciendo la ponderación correspondiente se llega a un número trófico que puede ser fraccionario. La disminución de este indicador revela las áreas de mayor sobre-pesca y comprueba un panorama gris para el océano.

Las medidas son fáciles de enunciar y de muy difícil implementación porque las fuerzas del mercado apuntan en la dirección opuesta. Entre ellas están la implementación de zonas de reserva, el control o prohibición de las redes de arrastre, el control de la captura no deseada. En general el manejo sostenible de los ecosistemas. El sistema de cuotas y creación de un mercado de permisos, que ha funcionado en otros casos, ha fracasado con la pesca. En el capítulo 7 se discute este asunto con mayor detalle. La acuicultura tanto en estanques, zonas costeras como en mar abierto es una actividad económica en expansión con inmensas posibilidades pero que requiere una mirada integral. La experiencia de la China, que utiliza los desechos agrícolas para alimentar dos o tres especies de peces en estanques que viven a diferentes profundidades y se complementan es interesante. En Vietnam hay avances interesantes en la biología del bagre. La fertilización del mar mediante la adición de nutrientes limitantes (hierro) o mediante la extracción de aguas profundas es una alternativa que apenas empieza a ser mirada.

6.7. Ciudades

Las ciudades modernas están diseñadas para los carros. Como resultado son cada vez más ruidosas, contaminadas, hay más congestión y los ciudadanos pierden mucho tiempo en vías congestionadas. Las vías públicas son desde el punto de vista económico bienes comunes, para los cuales la rivalidad en el

consumo es muy evidente cuando muchos quieren usarlas al mismo tiempo. Ya hemos discutido por qué los mecanismos de mercado no funcionan en el caso de los bienes comunes. Además la inversión pública para hacer más vías y ampliar la oferta beneficia a la minoría más pudiente que tiene automóvil particular.

Respecto a la vivienda, para la tierra urbana o suburbana, el mercado tampoco funciona para asignar eficientemente recursos mediante el mecanismo de precios. En el caso de una mercancía cualquiera, la escasez relativa genera precios altos, lo que incentiva la oferta. Con la tierra suburbana lo que ocurre es que unos cuantos se enriquecen y no hay manera de aumentar la oferta.

Las decisiones sobre los modelos urbanos son muy importantes porque tendrán impacto por 100 o más años. Además, las ciudades en desarrollo van a duplicar su área construida durante los próximos 40 años. En un plazo relativamente breve es necesario y viable incorporar elementos para hacerlas más amables para los ciudadanos. En la Sección A.2, se incluye una lectura con mayor profundidad sobre estos temas.

La urbanización se ha acelerado a un ritmo sin precedentes. En el año 1900 sólo el 10 % de la población (150 millones) vivía en ciudades, mientras que en el año 2000 se alcanzó el 46 % (2 900 millones). En 1800 sólo había una ciudad de más de un millón, hoy hay 326, entre ellas 19 de más de 10 millones: Tokio (26), México (18), Nueva York, San Pablo, Bombay, Delhi, Calcuta, Buenos Aires y Shanghai. En Colombia actualmente la población urbana es el 72 % (32 millones), cuando hace 50 años era el 30 %. Bogotá tiene 7 millones de habitantes y hay tres 3 ciudades entre 1 y 5 millones de habitantes. Otras 34 ciudades intermedias tienen población entre 100 mil y 1 millón de habitantes; y hay algo más de mil centros urbanos con menos de 100 mil habitantes. Las siete ciudades más grandes concentran el 65 % del PIB, Bogotá el 22 %. La densidad actual promedio de las ciudades es aproximadamente 10 000 habitantes por kilómetro cuadrado. En Colombia hay capitales de departamento con la mitad de esa cifra y otras con el triple.

La densificación trae ventajas y desventajas. La concentración de fuerza de trabajo para la industria y la concentración de la demanda generan economías de escala importantes. La vida cultural es posible por la variedad de ofertas y demandas. Las ciudades pueden ser punto de encuentro. Por el lado negativo son responsables del 80 % de la emisión de CO₂. Concentran el consumo de agua. Consumen el 77 % de la madera, generan grandes cantidades de basura, mucha congestión que lleva a ineficiencia, largos tiempos de viaje, deficiencias en transporte público e inseguridad. La accidentalidad vial se ha convertido en una de las principales causas de muerte.

Las medidas necesarias para mejorar y hacer más amables las ciudades incluyen regulación de la construcción para control de densidad, bancos de tierras,

mejoramiento del sistema de transporte público, mejores espacios peatonales, ciclo rutas y más y mejores parques, arborización y manejo de ríos, quebradas, lagos o costas. Es necesaria la regulación del uso de los carros. Se deben construir indicadores de desarrollo ciudadano de las ciudades, se deben mejorar e incluir como factores positivos el área de parques, el área de peatonales, los kilómetros de ciclo-rutas y como negativos el área de parqueaderos, la accidentalidad vial y las cifras de criminalidad. Las administraciones municipales deben acercarse a los ciudadanos, quienes deben ejercer control y hacer seguimiento. La planeación debe incluir límites al crecimiento y acuerdos con localidades vecinas y mirada regional.

6.8. Materiales

Las ciudades producen grandes cantidades de basura. Nueva York unas 12 000 toneladas por día, Medellín, 2 300. Hay que transportarla grandes distancias hasta su lugar de disposición. Para Nueva York está distancia a los sitios más distante es de 480 kilómetros. En el caso de Medellín es 50 km. Con carros que transportan 20 toneladas se requieren 600 y 80 viajes diarios respectivamente. Los rellenos llegan a su capacidad, se cierran y se construye uno nuevo, más lejos, más costoso. Los vecinos no lo quieren. El costo total de recolección y disposición por tonelada para el caso de Medellín puede llegar a \$150 000 por tonelada (US\$70). A esto habría que agregarle los costos ambientales, el impacto sobre el agua y el aire (emisión de CO₂ en el transporte y en la quema). Parece un problema sin solución. Hay sin embargo grandes oportunidades. En Medellín miles de personas viven del reciclaje, y podrían ser muchas más. El tema de esta sección es sobre la necesidad de reestructurar la economía de los materiales. La palabra clave es reciclar. Las fuentes principales para lo que sigue son Brown [2001]; Frosch [1994].

Globalmente se procesan unos 26 Pg de materiales al año, de los cuales 20 son materiales de construcción (arena, grava, piedra, cemento), 1 de mineral de hierro procesado para fabricar acero, 1,7 de leña, 1 de madera, 0,3 de pulpa de madera para papel, 0,7 de mineral para procesar 2400 toneladas de oro, 0,139 de roca fosfórica y 0,026 de carbonato potásico para producir fertilizantes.

Cada habitante de la tierra usa en promedio al año 140 kilogramos de acero, en automóviles, máquinas, varillas para reforzar concreto, y otros productos. Detrás de cada kg de material de producto final hay mucho más de materia prima. La relación para el caso del oro es extrema (300 000 : 1). Además para procesar el oro se usa cianuro, o mercurio, que contaminan gravemente. Estas cifras, tomadas de Brown [2001], son promedios mundiales, pero hay gran variabilidad de un país a otro. Por ejemplo para el caso del acero, el

Tabla 6.2: Tasa de desecho y uso de materiales desechables en los Estados Unidos durante 1997. Tomada de Brown [2001]

Producto	Tasa de Desecho %	Cantidad (Tg)
Pañales desechables	100	3,1
Platos, vasos desechables	100	4,9
Ropa y calzado	87	5,0
Llantas	77	3,3
Revistas	77	1,7
Papel de oficina	49	3,5
Electrodomésticos	48	2,1
Periódicos	45	6,1
Latas de aluminio	42	0,7
Latas de acero	40	1,1

Información original de EPA [1998]

consumo anual promedio por persona y por año es 352 kg en Estados Unidos, 98 en China y 24 en la India. El procesamiento de los materiales va asociado a consumo de energía.

Hasta ahora ha predominado una concepción lineal de los procesos económicos. Las materia primas se transforma en productos y punto. No hay preocupación por el origen de los insumos, ni por el destino de los productos. Pero el modelo de agotar los recurso es necesario reemplazarlo por el de regenerarlos, por un modelo sostenible. En lugar del esquema lineal es necesario el circular.

Los productos desechables, deliberadamente diseñados de esa manera, y los productos de rápida obsolescencia, propios de la posguerra del siglo pasado, deben quedar allá, en el pasado. En su momento significaron desarrollo y empleo, pero tal modelo no es sostenible. Los carros, la ropa, los computadores personales, los pañales, las vajillas y botellas, las bolsas, las cuchillas, son ejemplos típicos de productos en los cuales la estrategia dominante ha sido la del desechable. Pero la lista puede ser bastante más grande. Hay incluso estadísticas, ver Tabla 6.2. La moda y otras estrategias de mercadeo cumplen el mismo propósito.

La rápida obsolescencia tecnológica en el caso de los computadores personales y los celulares ha generado un problema parecido. Un computador tiene una complejidad grande de materiales, algunos tóxicos como el plomo, el mercurio y cadmio, lo que lo hace difícil de reciclar. Por ejemplo, cada computador personal tiene unos 2 kg de plomo y se estima que en Estados Unidos fueron

Tabla 6.3: Producción de metales y cantidad de mena extraída para su producción. Tomada de Brown [2001]

Metal	Producción (Tg)	Mena (Tg)	Relación
Hierro	0,571000	1,428	3
Cobre	0,012900	1,418	110
Oro	0,000002	0,741	300 000
Cinc	0,008000	1,600	200
Plomo	0,002980	0,119	40
Aluminio	0,023900	0,104	4
Manganeso	0,007450	0,025	3
Níquel	0,001230	0,049	40
Estaño	0,000200	0,020	100
Tungsteno	0,000031	0,013	400

Información original de USGS [1992]

descartados 315 millones de unidades entre 1997 y el 2005. Es decir 600 millones de toneladas de plomo. La dificultad para el reciclaje ha llevado a tasas muy altas de desperdicio, 90 %.

Algunos hablan de una nueva minería de la época moderna, la extracción de los minerales de los equipos de desecho. El problema es de tal magnitud que una de las alternativas más prometedoras es que el diseño tenga incorporado específicamente el proceso de reciclado. Sin embargo las posibilidades de continuar utilizando estos equipos que están en perfecto estado de operación por parte de otras personas con dificultad de acceso es una alternativa que en Colombia se ha usado con éxito en el programa Computadores para Educar.

Los materiales usados en la economía moderna se pueden clasificar en tres categorías: metales, minerales no metálicos y materiales de origen orgánico.

Los minerales no metálicos incluyen todos los materiales de construcción y las materias primas para la fabricación de fertilizantes. Son materiales abundantes, disponibles localmente, inertes y duraderos. Un adecuado manejo ambiental de los procesos de extracción es relativamente simple desde el punto de vista tecnológico. En nuestro medio hay mucha debilidad para hacer cumplir las normas ambientales y por tal razón la explotación de canteras es un problema. La industria del cemento contribuye significativamente a la emisión de CO₂ a la atmósfera.

La minería de metales puede ser muy destructiva del medio ambiente y es muy intensiva en el uso de energía para la extracción, transporte y procesamiento.

Con el tiempo, la minería de yacimientos de menor rendimiento se ha vuelto necesaria por agotamiento de los de alto rendimiento. El resultado es mayor riesgo de degradación del ambiente, pues se requiere procesar mayor cantidad de material. Existe tecnología para el manejo adecuado de la minería, sin embargo su completa aplicación no se logra en todos los casos por motivos económicos y debilidad de los gobiernos para ejercer control.

El acero es el material más utilizado, superando a todo el resto de metales combinados (ver Tabla 6.3). Cada caso merece un análisis particular, por ejemplo el aluminio usa mucha energía para su procesamiento, pero por ser liviano tiene importantes posibilidades para que su uso en vehículos permita ahorrar energía. El procesamiento del oro con mercurio o cianuro es muy perjudicial. El accidente en el río Tisza, en Rumania, en enero del año 2000 ilustra muy bien los peligros. Además, el principal servicio que presta el oro en la fabricación de objetos de joyería es muy discutible. El mercurio es acumulativo a través de la cadena trófica hasta adquirir niveles tóxicos. En Colombia hay problemas por esta minería en varios lugares.

El asunto de los materiales tóxicos es de magnitud. Hoy una muestra de sangre de un persona tomada al azar revela la presencia de más de 200 químicos que no estaban presentes en el cuerpo humano hace 100 años. Igual se puede decir de los animales. En los osos polares por ejemplo se ha encontrado acumulación de algunos compuestos que han producido malformaciones. Existe un listado de unos 650 químicos tóxicos, pero muchos materiales nuevos ni siquiera han sido estudiados. Hay reportes bien documentados de casos de contaminación por químicos de consecuencias graves para la salud y de accidentes con cientos de muertos. Sin embargo, también hay avances en los procedimientos y normas para el manejo y almacenamiento de estas sustancias.

Las siguientes cifras de Brown [2001] permiten fijar una idea de la magnitud del problema. En 1999, aproximadamente 3,5 Tg de compuesto tóxicos se liberaron al ambiente en los Estados Unidos. Esto equivale a 13 kg por persona. Por sectores los principales responsables son la minería de metales con el 50 %, las centrales termoeléctricas con el 15 %, el procesamiento de metales con el 9 %, la industria química con el 9 % y la industria de papel con el 3 %.

Un instrumento importante para el control y el manejo de los riesgos por sustancias tóxicas es un adecuado sistema de información. Esto debe incluir un inventario de las sustancias, de sus características y efectos. Cuantificación de los depósitos, vertimientos y emisiones por compañía, sitios y tiempos. Esta información debe ser abierta al público. El conocimiento de los riesgos por parte de la población es un factor fundamental para desarrollar la capacidad institucional y el capital humano necesario para ejercer el control.

Los efectos de los vertimientos y emisiones de esas sustancias se reflejan en la contaminación de las aguas subterráneas, la lluvia ácida y la calidad del aire

en algunas zonas y ciudades.

Los mecanismos del mercado están también en el corazón de estos problemas. Los precios no realistas, con subsidios, o que no incorporan las externalidades ambientales conducen al abuso. Por ejemplo, en algunos países con la intención de favorecer el empleo y el desarrollo le venden la electricidad mucho más barata a los compañías que procesan metales. Esta distorsión se refleja en una asignación ineficiente de recursos y en particular en costos ambientales.

La recomendación general es enfrentar el problema desde el diseño, con un enfoque sistémico. Nunca olvidar las relaciones con el entorno, el antes y el después de las cadenas. Los diseños deben ser sostenibles. La eficiencia en el uso de los materiales siempre debe tenerse en cuenta.

La legislación puede ser un instrumento importante. En principio los fabricantes deben ser responsables por sus productos hasta su disposición final. Es conveniente revisar la legislación y proponer normas modernas, por ejemplo en algunas ocasiones la reglamentación puede ser un obstáculo para el reciclaje.

Otra propuesta interesante es que las empresas manufactureras no vendan productos sino servicios, y sigan siendo dueñas de los desperdicios que seguramente considerarán para reuso. Por ejemplo las empresas que fabrican pilas, o tinta para impresoras, o bebidas, estarían obligadas a retomar los desperdicios de sus productos y a reciclarlos o a hacer una adecuada disposición final. Esto hace más evidente el ciclo para cada empresa y puede contribuir a cambiar la concepción del diseño.

Los sistemas de información completos y accesibles son otro elemento importante para un uso más adecuado de los materiales. Esto incluye tanto la composición de los productos como los costos.

Para ilustrar este enfoque sistémico con el ejemplo de una actividad de impacto importante, en la cual la mirada que se propone puede hacer una diferencia, a continuación se presentan los elementos principales de una lista de verificación para construcciones y renovaciones del Consejo Americano para construcciones verdes [LEED, 2002]. Es importante tener en cuenta que en la guía hay detalles sobre cada ítem y procedimientos para verificar cumplimiento y asignar puntajes. Algunas categorías son requisitos, otras dan puntos que luego se totalizan. Esto hace parte de un esquema de certificación. Ligado a la certificación pueden existir estímulos tributarios. Algunos de los elementos pueden no tener relevancia local.

Lista de Verificación para diseño sostenible de edificaciones:

- Selección del sitio
 - Prerrequisito de control de erosión y sedimentos. Se busca evitar impactos negativos durante la construcción. Es necesario tener un plan de manejo que incluya la protección del suelo y materiales contra la lluvia y el

- viento, el almacenamiento de capote y suelo orgánico para posterior reutilización. Prevención de la contaminación y sedimentación de alcantarillas y corrientes de agua.
- Selección del sitio. Se busca evitar la construcción en sitios inapropiados y reducir el impacto negativo. Evitar el uso de tierra agrícola de alta fertilidad, la construcción en sitios con riesgo de crecientes, la invasión al hábitat de especies en peligro de extinción, la invasión de humedales, reservas forestales, con uso reservado para parques. Seguir los requisitos del plan de ordenamiento territorial .
 - Urbanismo. Se busca canalizar la construcción a sitios que ya tienen desarrollo urbano y alcanzar las metas preestablecidas de densidad.
 - Recuperación de sitios deteriorados. Se busca rehabilitar sitios con problemas ambientales para reducir la presión sobre tierra no desarrollada.
 - Acceso al transporte público o alternativo. Se busca reducir el impacto por uso de automóvil particular. La localización a menos de 5 cuadras de línea de buses o metro. Para construcciones comerciales o institucionales incluir lugares adecuados para guardar bicicletas e incluir duchas para comodidad de los que usen ese medio de transporte. Privilegiar el sitio de estacionamiento de vehículos de transporte colectivo o que usen combustibles eficientes. Minimizar el espacio dedicado a estacionamientos.
 - Afectación mínima del entorno. Conservar las áreas naturales existentes y restaurar las afectadas. No intervenir innecesariamente la vegetación y evitar el desarrollo de áreas impermeables innecesarias. Cumplir los retiros y requisitos de los códigos locales sobre ocupación dejando un 25 % más de espacio libre. Los centros comerciales, campus de empresas, universidades y colegios deben tener plan de desarrollo con diseño ambiental.
 - Manejo de agua de escorrentía. Limitar el impacto y la polución de la escorrentía. Desarrollar planes para aumentar la infiltración, minimizar la superficie impermeable, el almacenamiento y la reutilización de aguas lluvias para fines donde no se requiera potabilización. Desarrollar trampas de sedimentos.
 - Manejo de isla de calor. Reducir el impacto de las construcciones por absorción de calor mediante adecuado manejo de sombrero natural y el uso de materiales y colores para techos, senderos y vías. Considere el uso de jardines en techos
 - Reducción de polución lumínica. Manteniendo iluminación necesaria para acceso nocturno, limitar la invasión lumínica a vecinos y al espacio. Hacer un diseño óptimo de la iluminación.
- Eficiencia en uso del agua
 - Limitar o eliminar el uso de agua potable para riego u otros usos secundarios. Use sistemas de irrigación de alta eficiencia, mida o use mediciones de

- lluvia y evaporación para optimizar la necesidad de riego. Almacenamiento y reutilización de agua lluvia.
- Manejo de aguas servidas. Reducción de la cantidad de agua servida generada y aumento de la recarga de acuíferos. Uso de tecnología eficientes en inodoros, tratamientos o pretratamientos en el sitio bien sea mecánicos, naturales, aeróbicos o anaeróbicos.
 - Ahorro de consumo. Minimizar el consumo de agua potable. Uso de duchas, canillas y equipos eficientes. Reciclado de aguas grises.
- Eficiencia en uso de energía y calidad del aire
 - Prerrequisito de cumplimiento de requerimientos mínimos de la edificación, los equipos, y los niveles de eficiencia energética. Disponer de cálculos de uso de energía y de estudio de potencial de ahorro.
 - Ahorro en uso de energía. En los equipos se debe tener en cuenta estufas, lavadoras, refrigeradores, acondicionadores de aire. Revisar cumplimiento de requisitos de emisión de fluorocarbonos para protección de capa de ozono. Instalaciones eléctricas, sensores de movimiento, luminarias.
 - Uso de fuentes renovables. Calentadores solares de agua, celdas fotoeléctricas, gas en lugar de electricidad para cocción. Molinos de viento. pequeñas hidroeléctricas
 - Medición de los consumos más importantes.
 - Potencia verde. Se refiere a contratos de suministro con compañías eléctricas basadas en fuentes renovables.
 - Eficiencia en uso de materiales y recursos
 - Prerrequisito. Uso y almacenamiento de material reciclable. El propósito es reducir los desperdicios generados por los ocupantes de la edificación que requieren transporte y almacenamiento en rellenos. Para tal fin se debe proporcionar un área para almacenar y clasificar los materiales usados y facilitar el reciclaje.
 - Re-diseño del edificio. La vida útil de la edificaciones se puede extender mediante reformas o reparaciones. La conservación del patrimonio cultural y de la tradición propia es importante. La conservación también contribuye a minimizar el impacto ambiental.
 - Manejo de desechos de construcción. Enviar el material reutilizable a los lugares adecuados. La demolición manual es preferible a la demolición destructiva.
 - Reutilización de recursos. Utilizar materiales y elementos de construcción que han sido usados, reconstruidos o son fabricados con material reciclado.
 - Uso de materiales locales o de elementos procesados localmente. Esto no sólo contribuye a la economía local y al ahorro de combustible y emisión de gases invernadero, sino que aprovecha las ventajas competitivas de los lugares y desarrolla la identidad cultural.

- Materiales rápidamente renovables. Se busca reducir el uso de materiales no renovables o de mayor tiempo de renovación, mediante la incorporación de material de origen vegetal, con períodos de crecimiento de menos de diez años.
- Madera certificada. Una de las estrategia económicas para la explotación sostenible de los bosques es la certificación. Con este criterio se busca eliminar la demanda por madera obtenida mediante extracción destructiva.
- Calidad del ambiente interior
 - Prerrequisito. Calidad del aire interior. En los sitios con acondicionamiento de aire es requisito un plan que tenga en cuenta posibles problemas y alternativas de solución. Durante la construcción también es necesario un plan.
 - Prerrequisito de Control de fumadores. Si el uso lo justifica, destinar cuartos especiales para fumadores, especialmente ventilados. Garantizar que los no fumadores no reciban perjuicios. Señalización.
 - Medición y control de CO₂ y de CO. Instalar mecanismos de medición o alarma por acumulación de gases perjudiciales en los sitios en los cuales hay riesgo.
 - Ventilación. Garantizar suministro adecuado de aire fresco para la salubridad y el confort.
 - Materiales tóxicos y fuentes de contaminación. Minimizar o evitar el uso de materiales irritantes, con mal olor, dañinos o con riesgo para quienes lo instalan o ocupan el edificio. Cuando sea necesario su uso, disponer de las medidas preventivas y de control adecuadas. Listados específicos de materiales con problemas conocidos: madera tratada, pintura, alfombras, asbesto. Sistemas de control de la entrada de contaminación de material particulado aéreo y polvo y mugre en zapatos.
 - Sistemas de control de temperatura, ventilación y luz según el tamaño de la edificación.
 - confort climático. El bienestar de las personas y su productividad dependen de condiciones adecuadas de temperatura, humedad y ruido. Disponer de un plan, y si son necesarios los equipos mecánicos, un plan de mantenimiento, medición y control.
 - Vista. El contacto visual con el exterior es un factor de bienestar importante. La iluminación natural, el adecuado asoleamiento, el manejo de las sombras y la privacidad deben planificarse. La armonización de la edificación con el ambiente y el diseño de la fachadas
- Innovación y diseño
 - Innovación en el diseño. El empleo de estrategias novedosas y apropiadas debe reconocerse.

- Profesional acreditado. Los diferentes profesionales pueden someterse a un proceso de acreditación de diseño ambiental, eficiencia energética y manejo sostenible de materiales.

6.9. Ejercicios

6.9.1. Seleccione una de las propuestas enumeradas para el mejoramiento de la productividad agrícola y consulte la literatura disponible, haga un breve resumen en el cual incluya una descripción de los métodos, sus fundamentos, los posibles inconvenientes, su estado actual de penetración, y los posibles impactos.

6.9.2. Las cifras para la agricultura en Colombia no son muy buenas si se compara con el mundo. En particular consulte, compare con los datos mundiales y explique las diferencias y la evolución temporal para área cultivada, productividad y área bajo riego de varios cultivos. Por ejemplo, entre 1961 y el 2003 el total de área cultivada en Colombia creció en promedio a una tasa del 0,2 % anual para llegar a cerca de 50 320 km², el área bajo riego creció en igual período al 4,2 % anual en promedio, con crecimiento mayor entre 1985 y 1995. Sin embargo con respecto al promedio mundial el área irrigada es muy baja. La productividad total sin embargo ha crecido más rápido que la población, a una tasa promedio del 2,6 % anual en ese intervalo. <http://faostat.fao.org/faostat>.

6.9.3. El concepto del barril de Liebig ha sido muy útil para explicar de manera integral los procesos agrícolas. En tal contexto, discuta la importancia de la fertilización, la irrigación, el mejoramiento de variedades, la mecanización, el control de enfermedades y el uso de herbicidas según las condiciones climáticas.

6.9.4. Consulte sobre cultivos transgénicos y resuma el debate que sobre su introducción se ha presentado.

6.9.5. Compare en todos los aspectos el cultivo de café bajo sombra con el café al sol.

6.9.6. Consulte la clasificación de los suelos agrícolas y las recomendaciones que de allí se derivan sobre usos. Discuta su aplicabilidad para el medio tropical.

6.9.7. Las propiedades de los suelos dependen del clima, la geología y la vegetación. Consulte sobre la importancia de estos factores.

6.9.8. Debata la afirmación de que una fábrica de suelo es un imposible.

6.9.9. Consulte la convención del mar de las Naciones Unidas de 1982. Desde el punto de vista de una explotación sostenible del recurso pesquero, cuáles son sus méritos y debilidades.

6.9.10. Colombia ha vivido de espaldas al mar. Consulte los diagnósticos existentes, la estructura institucional y las propuestas. Presente sus conclusiones.

6.9.11. En los últimos años los zocriaderos se han popularizado como una alternativa económica, sobre todo para especies promisorias. Haga una revisión de una de estas alternativas y evalúe los aspectos económicos, ambientales y culturales.

6.9.12. La evolución y co-evolución de los animales domésticos y el hombre ha sido objeto de varios estudios desde la época de Darwin, que tiene un interesante texto sobre el tema. Desde esta perspectiva científica cómo se puede enfocar la posibilidad de explotación de especies promisorias.

6.9.13. El clima y los suelos que soportan la vegetación más exuberante en la selva húmeda tropical no son aptos para cultivos. Discuta esta afirmación. ¿Es posible redefinir el concepto de cultivo para que exista alguna posibilidad de explotación sostenible?

6.9.14. Consulte la Ecuación Universal para calcular la pérdida de suelos, sus parámetros y las aplicaciones en Colombia.

6.9.15. Consulte sobre evaluaciones integrales de las prácticas de cultivo tradicional (cultivo limpio, con labranza, con fertilización, control de plagas con agroquímicos) y los llamados cultivos orgánicos (coberturas nobles, labranza mínima, fertilización natural, control biológico de plagas). Tenga en cuenta diversas condiciones climáticas, topográficas y de suelos.

6.9.16. Consulte sobre las basuras en su ciudad. Mire el problema desde todas las perspectivas, busque datos. Proponga soluciones.

CAPÍTULO 7

Social

Claro que es un tema complejo, pero dejarlo de lado sería más grave que incurrir en todas las limitaciones de lo que sigue. Como lo hemos dicho antes, muchos de los temas son apenas una invitación a profundizar. Las referencias básicas para este capítulo son Sen [2000]; Cohen [2005]; Sachs [2005]; Bloom [2005]; Daly [2005]; Montenegro and Rivas [2005]; Gibbs [2005]; Dasgupta [2001]; Brown [2006, 2003, 2001]

7.1. Demografía

La demografía es un elemento fundamental para el estudio de todos los asuntos sociales. Por ejemplo la discusión sobre pensiones depende en gran medida de la distribución actual y futura de la población por edades. La asignación oportuna de vacunas a las regiones y municipios, la planificación de la educación también requieren información y pronósticos de población. La perspectiva de largo plazo (50 años) a los asuntos ambientales, energéticos, económicos y sociales necesaria para la construcción del desarrollo sostenible requiere incorporar la componente demográfica.

A pesar de la actual tendencia a la estabilización y el consecuente envejecimiento, el crecimiento de la población en el próximo lustro será considerable, concentrado en la ciudades y en los países en desarrollo. Lo que incrementará la demanda sobre las instituciones, el medio ambiente, la economía y la agricultura. Afortunadamente, en el campo demográfico hay lugar a acciones efectivas y de bajos costos que sólo dependen de la voluntad política. En principio hay dos opciones, una basada en restricciones impuestas, la otra en la

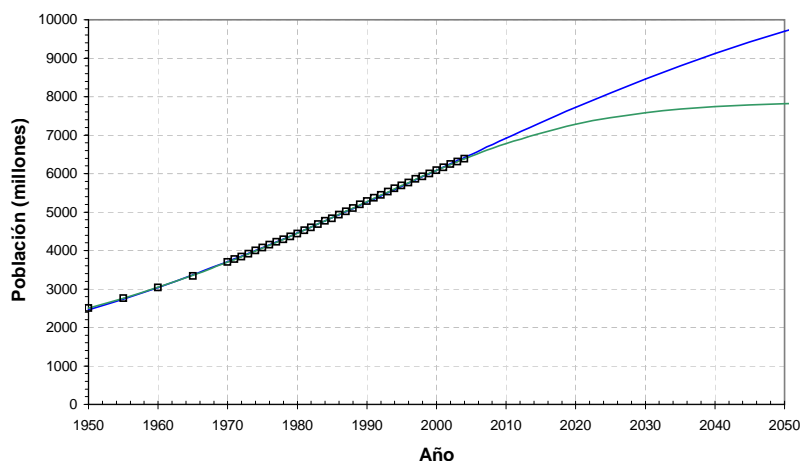


Figura 7.1: Población mundial, serie histórica y proyecciones. La línea superior corresponde al modelo $y = a(1 + be^{-cx})^{-1}$. La proyección inferior es mediante la ecuación $y = a(1 + e^{b-cx})^{-d}$. Datos de UN [2005].

libertad educada.

La primera parte de esta sección sigue a Cohen [2005]. Para la segunda parte la referencia fundamental es Sen [2000].

Los trascendencia de los cambios demográficos en esta década se puede apreciar de los siguientes hitos: desde el año 2000 los mayores de 60 años son el grupo de edad con mayor participación en el total, mayor que los menores de 5 años por ejemplo, la tasa de fecundidad es inferior a la tasa de conservación desde 2003 y más de la mitad de la población será urbana a partir de 2007. Nadie nacido antes de 1930 experimentó que durante su vida la población se duplicaría. Tampoco le tocará a los que nazcan después de 2050. Un particular privilegio para quienes nos correspondió vivir en esta época.

También es importante resaltar que la disminución en las tasas de crecimiento obedece a opciones voluntarias (excepto en China), no como antes, que ocurría por plagas, epidemias y guerras. Otro cambio gigantesco y de consecuencias profundas es que la relación entre la población en los países desarrollados y en los países en desarrollo que era de 2 a 1 en 1950, será de 6 a 1 en 2050.

En los próximos 50 años la población tendrá un incremento significativo, aunque desacelerado, además será cada vez más vieja y más urbana. No hay duda de tal pronóstico, pero los detalles no son fáciles y puede haber gran diferencia entre un lugar y otro. Igualmente, las hipótesis necesarias afectan bastante las proyecciones. El escenario medio es una población de 9 100 millones para el 2050. En este escenario se asume que la tasa de fecundidad continuará el

descenso de los últimos años. Si se aumenta esta tasa en medio hijo por mujer, la predicción sería de 10 600; y si se disminuye en medio hijo por mujer baja a 7 700. Si la tasa se mantiene a los niveles actuales la predicción es de 11 700 millones. La Figura 7.1 presenta la serie histórica y dos ejercicios de proyección.

Por la lógica del crecimiento compuesto, a pesar de que la tasa ha disminuido, el incremento será mayor que el de cualquier época anterior. Cada año hay 75 millones de personas más, mil millones en 13 años, entre el 2000 y el 2050 el incremento será mayor que la población existente en 1950. Además el crecimiento estará concentrado en los países en vías de desarrollo, en particular en India, Pakistán, Nigeria, el Congo, Bangladesh, Uganda, Estados Unidos, Etiopía y China (en orden). Estados Unidos es la única excepción, con más de un tercio del crecimiento por inmigración. En contraste, en 51 países, la mayoría desarrollados, la población se estabiliza o baja.

El envejecimiento progresivo es otra tendencia clara. La proporción de mayores de 60 pasó del 8,1 % en 1960, al 10,4 % en 2005. Mientras los menores de 5 años pasaron del 14,5 % al 9,5 % en igual período. Esto se explica por la reducción en la fecundidad y el aumento de la esperanza de vida. Sin embargo, los cambios no van a ocurrir de manera uniforme, en el año 2050 en los países desarrollados una de cada tres personas será mayor de 60, mientras que en los países en desarrollo sólo una de cinco. Incluso en algunos países habrá todavía mayoría de jóvenes.

Prácticamente todo el crecimiento será en las ciudades. Según las predicciones, en los países en desarrollo será necesario construir el equivalente a una ciudad de un millón de habitantes, cada semana, durante los próximos 50 años.

No es fácil sacar conclusiones económicas de los modelos demográficos porque el futuro depende también de decisiones políticas y de las instituciones que se tengan en ese momento. Pero la presión de este crecimiento demográfico, del envejecimiento y de la urbanización, sobre el medio ambiente y la capacidad productiva de la tierra es indudable.

La magnitud del problema ha llevado a algunos teóricos a proponerse la tarea de calcular la capacidad de soporte de la Tierra. El problema no es de sólo alimentos, realmente se calcula que el producto agrícola actual es suficiente para alimentar una población de diez mil millones. El asunto es general, se refiere a la capacidad de la Tierra para sostener la prosperidad material y la libertad de elección tal y como se entienda en el futuro y de si tal modelo es sostenible para las generaciones venideras. Pero la mayoría de los intentos para definir la capacidad de soporte de la Tierra tiene limitaciones porque reducen el problema a algún aspecto (el área de tierra o la energía o la biodiversidad o la atmósfera), e ignoran los otros. Además tal concepto no tiene en cuenta el carácter dinámico de las necesidades sociales. Hasta ahora este concepto no

se considera bien definido científicamente.

La gran mayoría de las ciudades están ubicadas en zonas fértiles o con ventajas de acceso. Su crecimiento significa una competencia con la agricultura. En números gruesos, el pronóstico para los próximos 50 años es que la población rural actual se mantiene aproximadamente constante (3 mil millones) pero que la población urbana se duplica (pasa de 3 a 6 mil millones). Si el área de las ciudades también se duplica, el porcentaje del área urbana pasaría del 3 al 6 % del total disponible. Si tal expansión es a costa del área cultivable que se estima en un 10 % del total, se tendría un impacto importante en la agricultura. Como se discutió en la Sección 6.1, desde hace décadas hay un estancamiento del área dedicada a la agricultura, lo que en principio generará dificultad para mantener los ritmos de crecimiento de la producción con menos tierra. En términos de ingresos, el impacto sobre la población rural seguramente será positivo. Pero el incremento en el uso de fertilizantes y plaguicidas necesario para aumentar la productividad sería una carga ambiental adicional a la actual.

En las ciudades habrá desafíos especiales para el transporte, la salubridad, los sistemas de acueducto y alcantarillado, la infraestructura y la calidad de la vida urbana.

El envejecimiento impone presión adicional sobre la sociedad, pues la relación entre el número de personas retiradas (internacionalmente se toma como referencia los 65 años) y el número en edad productiva (entre 15 y 64) crecerá aceleradamente. El impacto económico de estas tendencias demográficas no es automático por los cambios que se pueden esperar en salud (generalmente positivos), oportunidades de trabajo, legislación y en las instituciones existentes para soportar los retirados.

De igual manera se espera que aumente el ingreso relativo y la movilidad de los jóvenes con altos niveles de educación. Las mujeres no educadas tienen mejores posibilidades en el campo que en la ciudad. Estos cambios generan procesos que en términos generales minan las instituciones tradicionales sobre las cuales descansan las sociedades.

Simultáneamente, estos cambios en la distribución de la población por edades y entre urbana y rural pueden convertirse en una oportunidad inmensa para construir mejores ciudades e instituciones. Además, se puede demostrar que las medidas de control demográfico tienen importantes beneficios, muy bajos costos e impactos importantes a largo plazo. Sin duda la política demográfica es el asunto más urgente de la agenda global.

La comparación entre Bangladesh y Pakistan ilustra bien la importancia de la prontitud de las medidas. En 1971, cuando Bangladesh se separó de Pakistán, tenía 66 millones y este último 62. Pero desde ese momento sus políticas demográficas fueron muy diferentes. Inicialmente en Bangladesh hubo un compromiso fuerte por reducir la natalidad mientras que en Paquistán no, que

sólo enfrentó el problema recientemente. Como consecuencia, las tendencias demográficas en los dos países divergen, el número de hijos por familia es 3,3 en el primero y 5,6 en el segundo, y cada año la diferencia se amplía. En el 2050 Pakistán tendrá 80 millones más habitantes que Bangladesh, es decir un 30 % más. Lo que está en juego es la lógica elemental del crecimiento compuesto o geométrico.

Antes de presentar propuestas es conveniente resumir la discusión acerca de la necesidad de la coacción para el control natal. También se aportan algunos elementos sobre la discusión sobre el aborto. El recuento se basa en Sen [2000].

China ha venido practicando su política de un sólo hijo de manera coercitiva desde 1971. La pregunta es si este tipo de coacción es aceptable, a pesar de su eficacia, y la gravedad de la explosión demográfica a la que hubiera estado sometida si no se hubiera tomado ninguna medida. Esto plantea cuestiones muy profundas, que tienen que ver con los derechos y su concepción.

Los utilitaristas no admiten derechos naturales, menos derechos imprescriptibles. Jeremy Bentham por ejemplo concibe los derechos dependiendo de las consecuencias. En esta concepción la coacción sería aceptable. En contraste, para los libertarios los derechos se aceptan incondicionalmente, cualquiera sean sus consecuencias. En tal sentido la coacción es inaceptable.

Sen [2000] plantea una tercera vía, que parte de las consecuencias, pero que incorpora la satisfacción de los derechos como parte de los objetivos. Comparte con el utilitarismo el que se basa en las consecuencias, pero se diferencia porque aquel sólo tiene en cuenta consecuencias utilitarias. Comparte con la concepción libertaria la consideración de una importancia intrínseca a los derechos, pero se diferencia en que no les da una importancia absoluta independiente de las consecuencias.

Para esta tercera vía aunque los derechos de reproducción —la capacidad de la mujer o de la familia de decidir sobre el número de hijos, o si termina o no un embarazo, o si lo previene— son importantes no necesariamente se deben proteger de manera absoluta, en vista de que su ejercicio puede producir desastres, enorme sufrimiento y hambre.

Cabe entonces la pregunta de si habrá explosión demográfica si no hay coacción. Para esto es conveniente recordar la polémica histórica entre Condorcet y Malthus.

Condorcet había planteado el problema de la explosión demográfica antes de Malthus, en 1795. Según él, las tasas de fecundidad disminuirían voluntariamente y aparecerían nuevas normas basadas en el progreso de la razón, según las cuales el tamaño de la familia sería menor. Llegará un momento en que la gente “sabrán que si tiene una obligación para con los que aun no han nacido, esa obligación no es darles vida sino felicidad” (original de Condorcet en 1795,

citado por Sen [2000; pág. 261]). Como es fácil de deducir, Condorcet era un defensor de la educación de la mujer.

Malthus pensaba que tal progreso era improbable, no creía que los problemas sociales se pudieran resolver por medio de decisiones razonadas de las personas afectadas. Creía que la explosión demográfica era inevitable. Aunque su posición cambió algo con el tiempo, en lo fundamental se mantuvo. Un poco antes de su muerte (1834), en su última obra, insistió en su conclusión de que “no existe razón alguna para suponer que nada, salvo la dificultad de satisfacer como es debido las necesidades vitales, vaya a llevar a este mayor número de personas a no estar dispuesto a casarse pronto o a impedirles criar familias lo más grandes posible”, citado por Sen [2000; pág. 262]. Malthus pensaba que era necesaria una reducción forzosa de las tasas de crecimiento de la población y que la naturaleza sería la que provocaría tal reducción.

La historia le ha dado más la razón a Condorcet que a Malthus. El descenso general en las tasas de fecundidad ha sido atribuido al incremento del ingreso per cápita, la expansión de la educación, el aumento de la independencia económica de la mujer, la reducción de las tasas de mortalidad y la accesibilidad a los métodos de planificación familiar.

Los análisis estadísticos transversales muestran que los factores primordiales para explicar las diferencias en la tasa de fecundidad entre países o regiones con nivel comparable de desarrollo económico son la educación de la mujer, su independencia económica y el mayor poder que han adquirido las jóvenes en la toma de decisiones familiares. Estos estudios demuestran que el mejor anticonceptivo no es el desarrollo económico sino el desarrollo social. La educación no sólo les da independencia económica a la mujeres, contribuye a aumentar su poder de decisión, su posición social, su capacidad de expresión, su conocimiento del mundo exterior, su habilidad para influir en las decisiones de grupo.

La siguiente pregunta pertinente es sobre la eficacia de la coacción. El caso de China y el de varias provincias de la India es ilustrativo.

Primero es importante señalar que la política China de un sólo hijo ha tenido otras consecuencias además de la reducción de la tasa de crecimiento y del desconocimiento de los derechos reproductivos. Entre ellas el aumento de la tasa de mortalidad infantil en las mujeres, porque no se atiende la salud de las niñas enfermas con prontitud, o hasta se sospecha de cosas peores. Por ejemplo, hay un número mucho mayor de abortos de fetos femeninos que masculinos. Todo por una preferencia cultural por los hijos varones. Los adultos también sufrieron la pérdida de otros derechos fuera de los reproductivos, por ejemplo sus casas eran literalmente destruidas con dinamita si no obedecían la política de un sólo hijo. Además, no se sabe cual será la reacción una vez las restricciones se levanten.

Incluso es discutible si la coacción es la responsable por la disminución de las tasas de natalidad, o si hay otras razones que la puedan explicar. En paralelo China ha tenido un importante desarrollo educativo, social y de salubridad para la población en general, y en particular para la mujer. Cabe la posibilidad de que esto haya sido más significativo para lograr la reducción del crecimiento poblacional que la coacción.

La comparación que hace Sen [2000] entre China y la provincia India de Kerala es interesante. Ambos tenían tasa de natalidad semejante en 1950, de aproximadamente 4,4%. En el año 2000 pasó a 1,8% para Kerala y a 1,9% para China. Ambas tuvieron pues un rápido descenso, acompañado de un desarrollo educativo y social de la mujer en ambos casos, las otras variables económicas también son comparables. Kerala no tuvo medidas coercitivas y China tuvo la política obligatoria de un sólo hijo. La tasa de mortalidad infantil masculina por mil nacimientos en China es de 28 y la femenina es de 33, mientras que para Kerala las cifras respectivas son 17 y 16. No sólo casi iguales entre los géneros, sino también más bajas que las de China. Esto en condiciones económicas y educativas semejantes. Si se mira el período a partir de 1979, cuando se iniciaron las políticas coercitivas en China, las conclusiones no cambian. En tal fecha, la tasa de fecundidad de Kerala era de 3 frente a 2,8 para China. En 1991 las cifras correspondientes eran de 1,9 y 2. Es decir es descenso ha sido más rápido en Kerala, sin medidas coercitivas.

Además, hay otras razones adicionales a la eficacia en la reducción de la tasa de natalidad para justificar la política basada en el empoderamiento de las mujeres jóvenes y no en la coacción. La concepción de desarrollo como libertad es capital, pues en cada caso la educación y el avance social de las mujeres significa desarrollo en el sentido de ampliación de las libertades [Sen, 2000]. No sólo se gana en cifras de natalidad, se gana en bienestar de las mujeres y en general de la familia. Los individuos también valoran otras cosas además de su bienestar y seguridad económica, en particular la libertad, sus derechos humanos, políticos y de reproducción. La solución de los problemas sociales no requiere de menor libertad sino de más.

El ejemplo reciente de Irán es importante. En 1979 la revolución islámica asume el poder e impone concepciones religiosas para todos los asuntos civiles, entre ellas la prohibición del control natal, que se consideraba contra natura y un arma del imperialismo. Durante la guerra con Irak, la tasa de natalidad era del 4,4% y desde el poder se impulsaba el aumento del número de hijos para luchar por la patria. Con posterioridad, en 1989 luego del fin de la guerra y motivados por problemas económicos y ambientales, impulsado por un movimiento laico dentro del islam, el gobierno restituye un programa de control natal, crea programas de difusión de información, acceso gratuito a métodos y educación de la mujer. Hay participación de líderes religiosos en es-

tas campañas y cursos prematrimoniales. El resultado fue que la alfabetización femenina pasó del 25 % en 1970, al 70 % en 2000. La tasa actual de crecimiento poblacional bajó al 1,2 %. Este es otro caso para ilustrar cómo se pueden hacer importantes avances en poco tiempo, incluso respetando culturas tradicionales y religiosas. El ejemplo también refuerza la tesis del empoderamiento de la mujer.

Nuestra propuesta es simple y coherente con el resto de propuestas en el campo social. Su primer y más importante elemento es el mejoramiento del acceso a la educación hasta alcanzar cobertura universal en la educación básica. En la sección siguiente se justifica más esta propuesta. Con respecto a los asuntos demográficos es importante resaltar la importancia de la equidad de género. Es decir que en el proceso progresivo de mejora en la cobertura, la mujer debe tener especial consideración. En particular en los países o regiones donde la diferencia de género en el acceso a la educación es muy alta. La propuesta es que la mujer tenga suficiente capacidad de tomar sus decisiones reproductivas libre y responsablemente. Este es el principal ingrediente de la estrategia. La educación es elemento fundamental para el desarrollo de la independencia, la autonomía, la posibilidad de ser sujetas agentes de su propio destino. Esta propuesta coincide en buena medida con el análisis de Condorcet en 1795.

El segundo elemento de la propuesta es la difusión de información sobre métodos de planificación familiar y de acceso a los medios para toda mujer que libremente quiera planificar. El costo mundial de la salud reproductiva se estima en US\$17 000 millones al año. En Pakistán se calcula que el costo de evitar un nacimiento indeseado es US\$62, y el ahorro en servicios sociales US\$615.

Este tema tiene bastantes aristas, en la Sección A.4 se reproduce la traducción del trabajo clásico de Hardin [1968] sobre el tema, que plantea otros aspectos no considerados aquí.

El asunto del aborto tiene dimensiones que no se pueden ignorar, en el año 2000 se estima hubo 122 millones de embarazos “indeseados”. De ellos un tercio terminaron en abortos. Se calcula que cada año hay entre 10 y 20 millones de abortos ilegales y que mueren como consecuencia de complicaciones por condiciones inapropiadas entre 100 000 y 200 000 mujeres. Estas muertes representan entre el 20 % y el 40 % de todas las muertes asociadas a la maternidad, en algunos países este porcentaje puede llegar hasta el 50 %. La mayoría de estas muertes sería evitable. En los países con aborto legal, el número de muertes por esta causa es prácticamente nulo. Entre las mujeres que sobreviven estas prácticas ilegales también hay un número importante de casos con secuelas de infertilidad, infecciones en la pelvis, mayores riesgo de embarazos ectópicos y otras enfermedades. Estos embarazos indeseados se pueden evitar en la gran mayoría de los casos por otros métodos anticonceptivos. Sin embargo hay un número no despreciable de embarazos resultado de violaciones. También en

algunas circunstancias, hay embarazos deseados que pueden poner en riesgo la vida de la madre.

La discusión moral sobre el aborto puede referirse a las concepciones de la dignidad humana que se pueden presentar en tres teorías:

- La negación de la dignidad humana. Esta posición considera que ningún ser humano es excepcional o irreductible respecto al resto de la naturaleza. Corresponde a una concepción bio-céntrica o utilitarista.
- La afirmación de la dignidad humana. Se considera que la dignidad es una conquista de la libertad humana, y por tanto sólo algunos seres humanos son personas. Es la concepción estoico-kantiana, reutilizada después por el liberalismo filosófico.
- La dignidad humana es un don de todos los seres humano. La concepción religiosa recoge esta teoría.

En el primer caso el aborto es natural, en el último es una violación inaceptable y en el segundo caso hay lugar a mayor análisis y discusión.

7.2. Igualdad

En perspectiva histórica, la pobreza, la desnutrición, la falta de educación, acceso a la medicina, agua potable y sanidad han sido la regla. Sólo desde la revolución industrial con los adelantos científicos y tecnológicos que la acompañaron, un porcentaje grande de la población ha logrado escapar a estos flagelos. Sin embargo el avance no es total, para cinco sextos de la población actual sí, pero todavía subsiste un sexto con casi todas las carencias.

El desarrollo económico espectacular de los últimos 50 años que multiplicó por 7,1 el producto bruto y por 3 el ingreso per cápita, a pesar del crecimiento demográfico, no se ha irrigado a todos. Vivimos en un mundo socialmente dividido. La brecha económica y social entre la sexta parte más rica de la población (aproximadamente 1 000 millones) y la sexta parte más pobre es cada vez más amplia. Las diferencias son muy evidentes en nutrición, educación, salud, tamaño de las familias, tasas de fecundidad y esperanza de vida. La tendencia es a aumentar la desigualdad.

La Organización Mundial de la Salud reporta que 1 200 millones de personas sufren de desnutrición, bajo peso y hambres frecuentes. Simultáneamente, la sexta parte más rica sufre de sobrepeso, obesidad, estrés, enfermedades cardiovasculares y otras propias de la falta de ejercicio. La sexta parte más pobre sufre además de paludismo, tuberculosis, disentería y SIDA.

Los niveles de educación en el mundo industrializado contrastan con el analfabetismo de los países más pobres. Allá más de la mitad de los jóvenes se gradúa

de la universidad, mientras que acá hay más de 875 millones de analfabetas. Las desigualdades en educación son las peores, porque niegan las oportunidades.

Además de los 875 millones de adultos analfabetas, 115 millones de niños no van a la escuela. La mayor cantidad está en India, Pakistán, Bangladesh, Nigeria y Egipto. En este campo en los últimos 20 años China y México progresaron mucho, mientras que los anteriores no mostraron avances. En Colombia la cobertura bruta en educación primaria es total y el analfabetismo es del 7,6 % (en 1950 era del 38 %).

Globalmente el 60 % de los analfabetas adultos son mujeres. En Pakistán por ejemplo, el 40 % de los varones adultos son analfabetas, mientras que la cifra para las mujeres adultas es el 69 %. Estas cifras para la India son 32 y 55 % respectivamente, para China 8 y 24 %. Brasil es el único de los países populosos con iguales cifras para los dos géneros en el 15 %.

En Colombia la cobertura en educación superior es del 17 %, con un crecimiento importante, pero inequitativo. En 1993 estudiaban en la universidad sólo el 3,5 % de los jóvenes de los dos quintiles más pobres, mientras que para los dos quintiles más ricos la cobertura era el 35 %. En el año 1997, se pasó a 9 % y 65 % respectivamente. Un importante crecimiento, pero con aumento de la inequidad.

La tasa de crecimiento demográfico en los países europeos industrializados es virtualmente cero, mientras que en los países más pobres la tasa es mayor al 1,5 % y la población se duplicará en menos de 50 años.

La esperanza de vida que es el mejor indicador de desarrollo económico y social, refleja la distribución. En la segunda mitad del siglo XX la esperanza de vida creció muy rápido inicialmente por los adelantos en medicina, los antibióticos y por las mejoras en la productividad agrícola. Pero al final del siglo, no estaba subiendo en todas partes. En particular en los países más pobres de África pasó de 62 a 47 años, principalmente por la epidemia de SIDA. Los niños que nacen infectados por ejemplo tienen esperanza de vida de 5 años.

El SIDA se identificó en 1981, en 1990 había 10 millones de infectados, en el 2002 ya el número llegaba a 68 millones. De ellos la mitad en África. En Zimbabwe el 34 % de la población adulta está infectada, igual que el 25 % de los estudiantes de la Universidad de Durbin en Sudáfrica. Los únicos ejemplos históricos de una expansión tan rápida de una epidemia son la viruela en América en el siglo XVI y la peste bubónica en Europa en el siglo XIV.

Las 840 millones de personas que sufren hambre están principalmente en África sub-sahariana y en la India (población total de 700 y 1300 millones respectivamente). Hace 25 años la población con hambre estaba principalmente en la India y la China, pero está última ya ha resuelto este grave problema. La diferencia entre estos dos países no fue tanto la ganancia en producción de

alimentos, que fue semejante en términos relativos, sino la diferencia en las tasas de crecimiento de la población. Los países del África sub-sahariana tienen altas tasas de crecimiento poblacional y su producción de alimentos ha permanecido estancada, de allí el agravamiento de su situación.

La desnutrición ataca más duro a los niños y los jóvenes y tiene consecuencias irreversibles en el desarrollo del cerebro y en general en el desarrollo físico, lo que se refleja en dificultades de aprendizaje, en enfermedades futuras y en más baja esperanza de vida. Se estima que la mitad de los niños de Bangladesh y la India tiene problemas graves de nutrición, el 47 % en Etiopía, 27 % en Nigeria. Además en estos países, e incluso en aquellos que tienen cifras bastante menores, el problema ataca especialmente a algunas comunidades rurales, la mayoría en zonas áridas y a desposeídos de la tierra. La cifra de desnutrición general en Colombia es del 7 % y la infantil del 13 %.

Cada año nacen 20 millones de niños desnutridos de madres desnutridas. El efecto sobre el cerebro, el sistema inmunológico y nervioso es devastador. Comparativamente, tienen 10 veces mayor riesgo de muerte que los niños nacidos en California. Se estima que su estado salud es tan grave, que 60 % de ellos estaría en cuidados intensivos si estuvieran en un país industrializado. Expertos consideran que el 54 % de las muertes producidas por las cinco principales enfermedades tienen la desnutrición como causa de fondo. Además, la desnutrición en la niñez tiene un efecto muy negativo sobre la productividad en la edad adulta.

Los problemas de acceso al agua potable y a los sistemas de sanidad que se discutieron en el Capítulo 5 están concentrados en la población más pobre.

Algunos, sin embargo, pensamos que la humanidad está en capacidad de eliminar el padecimiento de la pobreza extrema. Los avances registrados en los últimos 25 años en China e India así lo sugieren. La estabilización de la población es un factor favorable. El crecimiento económico ha demostrado que contribuye a aliviar el problema, pero por sí sólo no es suficiente, a pesar de que es una condición. El trabajo de Sachs [2005] aporta luces en este sentido. Hay círculos viciosos que romper. Se requieren inversiones en educación, infraestructura, salud; pero no se tiene la capacidad financiera. Se requiere de liderazgo, visión, voluntad colectiva, e instituciones; pero no se tiene el capital social necesario. Sin embargo si hay un esfuerzo global, como el que se prometió en las metas del milenio, y la comunidad internacional, las agencias de desarrollo, las entidades financieras, las organizaciones no-gubernamentales y las comunidades conforman una red que aporte expertos, conocimiento, recursos y buena voluntad, es posible eliminar totalmente la pobreza extrema en el 2025 y superar la meta del milenio que sólo busca reducir el problema a la mitad para el 2015 [Sachs, 2005].

De igual manera como la medicina descubrió que las enfermedades tiene múlti-

ple causas y factores, los economistas han aprendido que la cura para la falta de desarrollo depende de un diagnóstico particular para reconocer las patologías económicas. Algunas de ellas incluso pueden estar por fuera del objeto tradicional de la Economía.

Las explicaciones tradicionales que atribuyen la pobreza a la raza, a la cultura, a la geografía, al clima, a la religión, al sistema de gobierno o a la corrupción se han ido demostrando falsas o parciales. Países con diversidades de toda clase y hasta con gobiernos corruptos han eliminado la pobreza absoluta y entrado a una rápida dinámica de crecimiento.

Se piensa que la geografía (recursos naturales, clima, topografía, cercanía a los mercados grandes, a las rutas de comercio), las instituciones, el capital social y la gobernabilidad son factores importantes para el desarrollo, pero que individualmente no son toda la explicación. Además hay maneras de contrarrestar las desventajas.

También es claro que el crecimiento mejora los indicadores medios, pero puede no mejorar la situación de los más pobres. Es necesaria la inversión del estado en áreas críticas, especialmente si se quiere un impacto positivo sobre los más pobres.

Hace 50 años los países de África tropical y los de Asia estaban en niveles semejantes de desarrollo y de pobreza. África se quedó estancada mientras que varios países de Asia han tenido enormes progresos. La explicación se apoya en diagnósticos específicos.

La revolución verde para la India por ejemplo fue muy importante, tuvo su origen en ayuda externa que encontró clima, suelos y llanuras favorables para combinar la irrigación con las variedades más productivas, la fertilización y la mecanización. El aumento en la productividad agrícola significó mejoras importantes en nutrición, liberó la mano de obra de la agricultura de subsistencia, los procesos de urbanización que siguieron permitieron mejoras importantes en educación, salud, participación de la mujer, capacidad tecnológica y de innovación.

Para los países de Africa tropical no hubo revolución verde. No había lluvias confiables para la irrigación, los suelos son pobres, las variedades de alto rendimiento no fueron apropiadas para las condiciones. La mano de obra ha seguido atada a la agricultura de subsistencia, las enfermedades tropicales han sido una carga muy dura. La mayor parte de la población vive en el interior por razones climáticas, los costos de transporte son altos. La poca inversión externa se ha reducido a la extracción de recursos.

Existe tecnología para superar esas limitaciones. La malaria se puede controlar con mosquiteros, fumigación restringida al interior de las viviendas y diagnóstico rápido a los infectados para un tratamiento rápido y para evitar contagio.

Esto último se hace a muy bajos costos, con toma de muestras y diagnósticos a microscopio barato realizados por personal local en tiempo libre. Los costos de transporte se reducen con carreteras y comunicaciones modernas. La agricultura se hace productiva con riego por goteo, con fertilización incorporada y dosificada según estudios rutinarios de suelos.

La ayuda externa es necesaria para financiar estas medidas. Se estima que si se orienta bien la ayuda existente es posible lograr las metas del milenio e inclusive erradicar la pobreza absoluta para el 2025.

En conclusión, la receta general para eliminar la pobreza es la inversión estatal en educación, nutrición infantil y de madres embarazadas, programas de equidad de género, acceso a la salud, agua potable y alcantarillado e infraestructura de transporte y comunicaciones. La ayuda externa puede ser necesaria en algunos casos.

Las inversiones en educación, nutrición y salud buscan garantizar igualdad de oportunidades. La más importante y para algunos la única igualdad que se debe buscar y alcanzar. La educación se discute con mayor detalle en la Sección 7.4.

7.3. Desarrollo

Sen [2000] concibe el desarrollo como un proceso de expansión de las libertades reales que disfrutan las personas. Este pensamiento incorpora la concepción tradicional del crecimiento del producto interno bruto, el ingreso per cápita, la industrialización, los avances tecnológicos o la modernización social, pero la trasciende. La primera parte de esta sección resume su pensamiento.

En este contexto la libertad real, substancial o positiva se entiende como la capacidad de enriquecer la vida que llevamos y las oportunidades que disfrutamos, para ser más completamente personas integrales, sociales, en ejercicio de la voluntad propia, en interacción con el medio y la sociedad y con la posibilidad de transformar el mundo en el que vivimos. En este sentido la libertad es intrínsecamente importante, es el principal objetivo del desarrollo y de la política pública. Además de ser el fin primordial, la libertad es el medio principal del desarrollo.

Esta concepción no es nueva. Se puede rastrear sus orígenes a Aristóteles en su *Ética a Nicómano*: “*la riqueza no es, desde luego, el bien que estamos buscando, pues no es más que un instrumento para buscar otro fin*”. Tocqueville decía que “*el que pregunta ¿libertad para qué? es que ha nacido para servir*”. Marx y Engels en la *Ideología Alemana*: “*sustituir el dominio de las circunstancias y de la suerte sobre los individuos por el dominio de los individuos sobre la suerte y las circunstancias*”.

Entre las libertades fundamentales se encuentran la capacidad para evitar el hambre, la desnutrición, las enfermedades curables, la mortalidad prematura, la capacidad para leer, escribir, calcular, la participación política, la libertad de expresión, de movilidad.

Desde esta perspectiva, la pregunta acerca de si la democracia favorece o por el contrario obstaculiza el desarrollo está mal planteada. Las libertades políticas son parte esencial del desarrollo. En la misma categoría caben otras preguntas, por ejemplo sobre la efectividad de la educación para el desarrollo. La educación amplía las libertades, por lo tanto es desarrollo. De hecho si se plantea adecuadamente, esta discusión se refiere a la inter-relación existente entre las diferentes componentes de la libertad, lo que constituye un poderoso complemento de la importancia intrínseca de la libertad.

La libertad real, en contraste con la falta de restricciones, significa la posibilidad de acceder a oportunidades. Las capacidades se desarrollan y van más allá de lo innato. Por ejemplo, capacidad para razonar con otros acerca de los problemas sociales, para llegar a decisiones. La capacidad no es una garantía de uso.

Igualmente, la libertad no es sinónimo del bienestar. Es conveniente distinguir la importancia derivada del uso real de la libertad, de su importancia intrínseca, el tener la posibilidad de elegir o no algo. Pueden haber razones poderosas para tener una opción, para poder rechazarla. Como lo ilustra muy elocuentemente el ayuno de Mahatma Gandhi contra la ocupación Inglesa. Una víctima de una hambruna no tiene la libertad de protestar de esa manera.

Hay libertades instrumentales que también hacen posible la libertad real. Este papel de medio para alcanzar el desarrollo no merma en modo alguno la importancia valorativa de la libertad como fin del desarrollo. Entre la libertades instrumentales se destacan la libertad política, la libertad económica, las oportunidades sociales, garantía de transparencia, seguridad social. Estas libertades instrumentales están interconectadas y son complementarias. Por ejemplo, el crecimiento económico puede contribuir a la inversión social. Las oportunidades sociales, especialmente en el campo de la educación básica, han demostrado tener impacto muy grande en el crecimiento económico. Sen [2000] hace la observación que en ninguna democracia se han presentado hambrunas masivas para ilustrar el efecto de las libertades políticas sobre la libertad económica.

La capacidad de tener un trabajo decente es una de las libertades instrumentales con mayor impacto en el el progreso social. La Organización Internacional del Trabajo ha resumido bien el significado de esta libertad: “El objetivo primordial de la OIT es promover oportunidades para que las mujeres y los hombres tengan un trabajo decente y productivo en condiciones de libertad, igualdad, seguridad y dignidad humana”. El trabajo decente resume las aspiraciones de los individuos en lo que concierne a su vida laboral, e implica

oportunidades de obtener un trabajo productivo con una remuneración justa, seguridad en el lugar de trabajo y protección social para las familias, perspectivas de desarrollo personal e integración social, libertad para que los individuos manifiesten sus preocupaciones, se organicen y participen en la toma de aquellas decisiones que afectan a sus vidas, así como la igualdad de oportunidades y de trato para mujeres y hombres. El trabajo decente debería constituir la esencia de las estrategias globales, nacionales y locales para lograr el progreso económico y social. Es indispensable para los esfuerzos destinados a reducir la pobreza, y como medio para alcanzar un desarrollo equitativo, global y sostenible.

En concordancia con este concepto ampliado del desarrollo es necesario incorporar indicadores que trasciendan el crecimiento económico. Además del producto interno bruto, su tasa de crecimiento o el ingreso per cápita, que son los estándares para medir el desarrollo económico, se han desarrollado importantes indicadores alternativos del desarrollo integral o el desarrollo humano. La esperanza de vida y la distribución del ingreso están entre los más aceptados. En los ejercicios se presentan algunas ideas sobre este tema.

Una breve discusión acerca de los mercados como instituciones que promueven el desarrollo es pertinente [Sen, 2000; pág. 142]. Los mercados permiten el intercambio y la asignación de recursos de manera eficiente. Cuando la competencia funciona, el mercado permite premiar a los productores eficientes y castigar a los ineficientes, los consumidores pueden acceder a los productos más económicos. Los precios que resultan del mercado transmiten la señal a productores y consumidores sobre los costos y las oportunidades existentes. Realmente el mercado existe porque hay libertad para que los consumidores puedan acceder a los productos que se requieran en función de los precios. Igualmente para los productores el mercado significa la libertad de buscar los mejores precios. La esclavitud es un ejemplo de negación de la libertad del mercado de la fuerza de trabajo. Las mejores páginas de Marx y Engels sobre el capitalismo y los mercados se refieren a su papel en el desarrollo de las fuerzas productivas, en particular cuando se refieren a la esclavitud como negación de la libertad de mercados. Por tal razón, estar en contra de ellos es como estar en contra de la conversación entre las personas, del libre intercambio de ideas. El fracaso del socialismo burocrático se explica en parte por la ineficiencia económica de los mecanismos para la asignación y distribución de los recursos que supuestamente reemplazaban los mercados. Pero además estas instituciones representaban una pérdida fundamental de libertades, entre ellas las económicas. La población de estos países era (es) bastante sensible a los asuntos relacionados con la libertad en general. Las reformas posteriores en los países socialistas que han demostrado importantes resultados se refieren al retorno de mecanismos de mercado, como es el caso en China, Vietnam y

Cuba. Reformas que por lo demás han recibido amplia aceptación por parte de la población.

Existe un resultado teórico sobre la eficiencia de los mercados, el teorema Arrow–Debreu que establece que los resultados del mecanismo de mercado no pueden mejorarse en el sentido de aumentar la utilidad de todos sin reducir la de otros. Es posible extender el teorema para el caso de libertades individuales. Sin embargo, esta afirmación teórica no dice nada sobre la equidad. En otras palabras, la teoría deja abierta la posibilidad de que sea necesario complementar los mercados con mecanismos de protección a los más desfavorecidos.

Es claro que los mercados tienen imperfecciones, como el monopolio, las barreras artificiales, la información incompleta. En algunos casos, cada operación de mercado tiene detrás unos costos de transacción que pueden ser muy altos y aun prohibitivos, si el entorno legal y el de seguridad no son los adecuados. Pero, la limitación de la competencia no produce beneficios sociales. Hay una larga tradición de pensamiento económico en Adam Smith, David Ricardo y Karl Marx a favor del capitalismo competitivo como una fuerza progresista y en contra de argumentos pre-capitalistas contra la competencia. Esto a pesar de la crítica de Marx al capitalismo. Las medidas que limitan la competencia benefician intereses particulares en contra de los intereses generales. Estos intereses particulares tienen poder político y logran imponer su punto de vista porque el interés general es mal defendido. El perjuicio general es la suma de muchos perjuicios individuales pequeños. Por tanto cada individuo aisladamente no tiene igual motivación para defenderse de tal perjuicio en comparación con la magnitud del interés particular que se beneficia de la restricción en la competencia. Los remedios para tal desviación son el debate, la libertad de información, y la libertad política, que deben conducir a que prevalezca el interés general. Este es un claro ejemplo en el cual la libertad política debe producir efectos positivos sobre el crecimiento económico.

Es muy paradójico que a pesar de la claridad teórica sobre estos temas que desde hace décadas han aportado los economistas clásicos, incluyendo los marxistas, hoy, en nombre de posiciones progresistas se defiendan privilegios con argumentos insostenibles contra de los mercados.

Pero los mercados sí pueden tener imperfecciones y es necesario que haya intervención del estado para corregir cuando sea necesario. Sobre la intervención estatal en los mercados financieros hay una polémica interesante entre Adam Smith y Jeremy Bentham en 1787 en la que este último, tradicionalmente defensor de la intervención estatal, le da clase al gurú de la economía de mercado que proponía un límite estatal a la usura [Sen, 2000; pág. 157]. Los argumentos de Adam Smith se referían a capitalistas aventureros, especuladores que podían aprovecharse del mercado y perjudicar el bien común. Respecto al abuso del medio ambiente esta polémica histórica tiene relevancia actual.

El debate sobre la globalización es en últimas acerca de la distribución desigual del poder mas que acerca de la eficiencia de los mercados o acerca de la tecnología. El intercambio internacional —no sólo de mercancías— ha sido siempre un factor de progreso en ambas direcciones por miles de años. La influencia cultural y científica de China, la India, el mundo árabe sobre occidente no se puede despreciar. No concuerda con la evidencia el argumento de que por la globalización los pobres son cada vez más pobres. La posición que se debe plantear debe ser sobre la manera de aumentar el beneficio a los más pobres aprovechando las oportunidades de la globalización. Esto requiere políticas internacionales, nacionales y locales: mercados realmente abiertos, sin proteccionismo disfrazado por parte de los países avanzados, mejora en la educación, salud pública, equidad de género y reforma agraria. Las leyes de patentes requieren reexaminarse.

Además, entre las instituciones que se globalizan el mercado es sólo una de ellas, se requiere una democracia global y probablemente un gobierno global para algunos asuntos. La democracia se construye mediante la participación, la expresión de las ideas y los análisis sobre los problemas. La prensa y demás medios de comunicación, incluyendo internet, tienen un papel importante en este proceso. Las razones y los argumentos se deben expresar. El debate abierto y público, apoyado en información accesible, objetiva y en argumentación rigurosa es elemento esencial de la construcción de una ética política. El poder de las ideas no es despreciable. La democracia depende de lo que estemos dispuestos a contribuir en su construcción. Muchos intelectuales y técnicos desprecian la política. A nadie se le puede obligar, pero es una pérdida social muy grande que no contribuyan con sus análisis, probablemente hay temas de los cuales son quienes más saben. La sociedad muchas veces no tiene en cuenta su saber, pero ellos podrían contribuir más activamente.

Es conveniente mantener una actitud crítica frente a todo, en particular frente a las ideologías que condenan o sacralizan los mercados. Ya se expresó que la oposición por principio a los mercados es semejante a la oposición al diálogo o la conversación, es una oposición a la libertad. Pero igualmente hay casos en los cuales los mercados no funcionan. En particular en el caso de los bienes comunes y/o públicos (Sección A.5), que están entre los que más contribuyen a las capacidades humanas. Igualmente frente al largo plazo los mercados tienden a ser miopes.

La salud, la educación, el medio ambiente son algunos de los bienes comunes y/o públicos para los cuales los mercados tienen limitaciones o simplemente no funcionan y sobre los cuales es necesaria la intervención estatal. Actualmente aparece una complicación adicional, no hay un estado mundial, y en el caso del cambio climático es necesaria la intervención de un ente global.

El tema no es nuevo. En particular es clásico entre la comunidad científica el

trabajo de Hardin [1968], un biólogo experto en genética, titulado *La Tragedia de los Comunes* que se reproduce en la sección A.4. El ejemplo de un pastizal comunal que inevitablemente llega a la sobreexplotación como resultado de las acciones individuales motivadas por el interés privado ilustra la esencia del argumento. Cada miembro de la comunidad ve un beneficio unitario de aumentar en un animal su hato que se alimenta en el pastizal común, pero sólo aprecia una fracción del costo del sobre-pastoreo, que se divide por el número de miembros. Inicialmente el tamaño del bien puede ser muy grande y no se evidencia el problema, pero inevitablemente aparecerá. Esto pone en cuestión el argumento de la mano invisible del mercado de Adam Smith. También ilustra el papel de la propiedad privada como una institución (imperfecta) para la asignación eficiente de muchos bienes. Pero, lo que es de todos es de nadie. La preocupación original de Hardin era la población, pero el argumento es general a otros bienes comunes o públicos, como es el caso del medio ambiente.

La educación puede contrarrestar la tendencia natural a hacer lo incorrecto desde el punto de vista común por motivos individuales, pero la inexorable sucesión de generaciones requiere que las bases de este conocimiento sean refrescadas constantemente. La prohibición es fácil de legislar, pero no necesariamente fácil de imponer. Pero ¿cómo legislar la moderación? También parece muy ingenuo el pensar que con base en la conciencia se puede solucionar esta tragedia. En palabras de James E. Lovelock, el autor de la teoría de GAIA: “¿Cree alguien que los humanos, carnívoros con algo de inteligencia y con tendencia genocida, por algún acto de bondad, nos podremos transformar en sabios e inteligentes mayordomos para cuidar de la Tierra y la vida natural de nuestro planeta?”.

La solución propuesta por Hardin es la coerción mutua, mutuamente acordada. Todos los arreglos sociales que producen responsabilidad son arreglos que generan coerción de algún tipo. Decir que acordamos la mutua coerción no es decir que debemos disfrutarla, o incluso, pretender disfrutarla. ¿Quién disfruta los impuestos? Todos nos quejamos de ellos. Pero aceptamos los impuestos obligatorios porque reconocemos que los impuestos voluntarios favorecerían la inconsciencia. La institución de los impuestos y otros medios coercitivos realmente son medios para escapar de la tragedia de los recursos comunes.

Esta propuesta de coerción mutua, mutuamente acordada que fue introducida por la imperfección de los mercados, también se puede concebir desde la perspectiva del concepto de desarrollo como un proceso de ampliación de las libertades. Aunque a primera vista parezca paradójico que la propuesta de solución se refiera a la necesidad de coerción. La coherencia se entiende al mirar las libertades comunes, no sólo las individuales. La coerción mutua, mutuamente acordada es la base de las instituciones sociales que son factores de desarrollo y cuya construcción finalmente busca ampliar las libertades, aunque

aparezca a primera vista que es a costa de restricciones.

La importancia de los aspectos institucionales para el desarrollo económico ha sido objeto de estudio reciente. Kalmanovitz [2006] ha sido pionero de la aplicación de estas ideas al caso de Colombia. En la referencia indicada se puede encontrar mayor detalle y referencias a las fuentes originales. Lo que sigue es un muy breve resumen.

Desde el siglo XVII algunas de las enseñanzas de la religión católica, y del cristianismo en general, han entrado en algún tipo de conflicto con el capitalismo. La reforma protestante y las guerras religiosas que continuaron son en parte respuesta a esas nuevas realidades. Todavía hoy, en el trasfondo de algunos conflictos políticos se viven estas discrepancias, por ejemplo con el mundo musulmán, e incluso con algunas manifestaciones de la ideología revolucionaria en América Latina con influencia Católica. La ética religiosa cristiana original pone la fe por encima de la racionalidad, limita al individualismo, tiende a identificar la riqueza con el pecado, se opone al crédito que lo identifica con la usura. Condena también el ahorro al asociarlo con la avaricia. Pero el ahorro es necesario para garantizar el crecimiento económico. La falta de previsión se funda sobre la esperanza en lo sobrenatural.

El calvinismo y el luteranismo reformaron algunos de los elementos éticos del cristianismo, haciéndolo más apropiado para el desarrollo del capitalismo y la cultura burguesa. A su vez, estas reformas retro-alimentaron las instituciones políticas. Por ejemplo, en buena medida la democracia en Norte América proviene de la cultura que trajeron los inmigrantes, víctimas de persecución religiosa que pusieron muy clara entre otras cosas la diferencia entre Estado y religión.

Las instituciones legales tienen impacto importante sobre el desarrollo económico. Se afirma por ejemplo que la posibilidad de que las cortes en Inglaterra aceptaran demandas de ciudadanos extranjeros fue un factor fundamental para que se convirtiera en potencia en la época del mercantilismo. En sentido contrario, los problemas del sistema judicial en Colombia, su casuismo, lentitud y la inseguridad jurídica son responsables en alguna medida de nuestro atraso. Una de las consecuencias de esta ineficiencia jurídica es que las firmas, en su afán de maximizar ganancias, tienden a tener ciclos cortos de inversión y poco capital fijo. Los negocios más rentables son el comercio, la redistribución y el mercado negro.

A un nivel más general está el concepto de capital social, el conjunto de valores compartidos por una sociedad, que le permiten mantener esa cohesión de trasfondo sin la que resulta imposible organizar la convivencia. El capital social se apoya en la aceptación voluntaria de las normas, en las costumbres, la instituciones desde su base más local y muchas veces no escrita ni formalizada, e incluye hasta el pluralismo y la democracia. Cortina [1995] dice que el

pluralismo quiere decir que en una sociedad hay distintas éticas de máximos que hacen distintas propuestas de vida feliz, y esas distintas éticas de máximos comparten unos mínimos de justicia que se concretan en valores y en principios. En ese sentido, una sociedad pluralista no es una sociedad moralmente monista, que le impone a todos los ideales máximos propios de una religión, en la cual no hay separación entre religión y estado. Tampoco es una sociedad moralmente politeísta, en la que todo es aceptable. Hay unos principios mínimos que todos aceptamos que nos permiten vivir en sociedad.

La única manera de tener mejores instituciones es mediante la política, entendida como el esfuerzo por crear leyes, formas duraderas de administración de lo público, instituciones que no intentan mejorar la condición humana sino la sociedad humana. Los ideales políticos son diferentes de los religiosos, morales, estéticos o de otra índole. Nunca son absolutos, no son utopías. Éstas buscan lo imposible, los conformistas se resignan con lo probable y no miran más allá; el idealista político en cambio se esfuerza por lograr lo posible, aunque no sea fácil y aunque nunca se sienta satisfecho. Todos los ideales políticos son progresivos.

Dice Savater [1991] que vivir en democracia es convivir con costumbres y comportamientos que uno desaprueba. Convivir es contrario a la eliminación del otro, a su exclusión, a las limpiezas étnicas. Colateral a la convivencia con asuntos que uno no aprueba está el derecho de expresión, limitado sólo por la protección de la intimidad o por la incitación al crimen. En una democracia moderna debe haber una única base, conformada por las leyes y pactos, que son iguales para todos, que resguardan los derechos y determinan los correspondientes deberes. Debe haber jerarquía en las normas, equilibrio de poderes, sistemas de control. Es preferible el gobierno de las leyes al de los hombres, los gobernantes no pueden estar por encima de las leyes. Los impuestos son necesarios para la operación de los asuntos comunes, pero a los gobernantes se les debe pedir cuentas. Además de ser un método para tomar decisiones, la democracia tiene unos contenidos y principios irrevocables: el respeto a las minorías, a la autonomía personal, a la dignidad y la existencia de cada individuo. Ver Cortina [1995]; Hoyos-Vásquez [1995]; Savater [1991], <http://www.javeriana.edu.co/pensar/>.

El desprecio post-moderno por la política, por los asuntos públicos, alentado muchas veces por la corrupción de los gobiernos, el desánimo ante la falta de resultados y el desgaste en luchas estériles, es en el fondo una actitud auto-destructiva. Los griegos inventaron la palabra idiota para referirse a estos ciudadanos. El futuro de nuestra aldea global pasa por que haya menos idiotas.

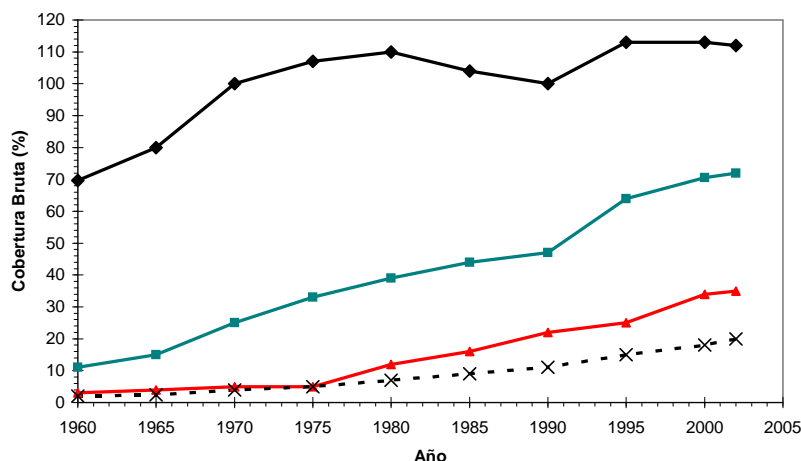


Figura 7.2: Series históricas de la cobertura bruta en educación (total de matriculados sobre el total de población en el grupo de edades establecido para cada modalidad). La línea superior corresponde a la primaria, luego la secundaria, la pre-escolar y por último la superior (línea punteada). Datos de MEN-Colombia [2002].

7.4. Educación

Como sucede cuando los intereses oscurecen la razón, para quienes hemos dedicado nuestras vidas a la educación es fácil aceptar los argumentos a su favor y no ser lo suficientemente críticos. Conscientes de este riesgo procederemos a utilizar un argumento mucho más radical. Tradicionalmente se señala que la educación genera desarrollo económico. Con Sen [2000] diremos que la educación es parte integral del desarrollo y que además tiene importantes efectos complementarios sobre las otras componentes, incluyendo la componente económica.

La concepción del desarrollo como proceso de expansión de las libertades está en el corazón del argumento. La educación significa fundamentalmente una ampliación de la capacidad para escoger, para tomar mejor las decisiones sobre el tipo de vida que se quiere vivir. El aprendizaje y perfeccionamiento del lenguaje, de la capacidad de calcular, de razonar, de escrutar los razonamientos ajenos y de formular los propios, de anticipar el futuro y prepararse para construir uno mejor, permiten ejercer a mayor profundidad la libertad en el entorno social. En otras palabras la educación busca desarrollar autonomía en el pensamiento y en las decisiones, y capacidad de convivencia. Más breve, la educación es para la libertad. Incluso el papel que puede desempeñar la educación como medio para aumentar la destreza o la capacidad productiva en un oficio o profesión particular es una ampliación de la libertad económica

en la medida que significa mejora del ingreso. También de manera indirecta trae consecuencias sobre el cambio social, al desarrollar la capacidad para hacer valer los derechos y para participar de forma constructiva en los procesos sociales, lo que a su vez aumenta las libertades.

El aspecto restringido de la educación para potenciar la capacidad productiva, que se refleja en la diferencia de ingresos según el nivel de escolaridad, ha sido objeto de muchos estudios recientes en la literatura económica bajo el nombre de capital humano [Becker, 1993; Montenegro and Rivas, 2005; pág. 147]. Se ha demostrado que el capital físico explica de manera muy restringida la diferencia de ingresos entre los países y su evolución en el tiempo en cualquiera de ellos. Que es necesario incluir aspectos no tangibles como la formación, el entrenamiento, la destreza, la nutrición y la salud de las personas. En particular la creciente aplicación de la ciencia y la tecnología a la producción ha sido uno de los mayores factores de crecimiento económico. Tales conocimientos se incorporan no sólo en maquinaria y equipos, sino también en personas que realizan procedimientos y organizan las actividades.

El consenso actual es que la educación es necesaria para el crecimiento económico, pero no es suficiente. Otros factores son necesarios, entre ellos los tradicionales en los análisis económicos: una sana política monetaria, la existencia de mercados eficientes y bajos costos de transacción.

En distinción con el término de capital humano, se ha empleado el de capacidad humana, como expresión de la libertad [Sen, 2000; pág. 350]. Ambos están relacionadas pero son distintos. La relación es semejante a la que hay entre medios y fines. Como medio, el papel de la educación para los cambios sociales es probablemente más trascendental que su papel económico. La educación es un instrumento fundamental para reducir la desigualdad, mediante la generación de igualdad de oportunidades.

La educación básica universal necesita acompañarse de almuerzos escolares para los más necesitados y programas de nutrición a mujeres embarazadas y lactantes, para así romper el círculo vicioso de la desnutrición que produce rezago de por vida.

La educación es un sistema, como tal tiene componentes que se relacionan. El equilibrio entre estas partes no puede descuidarse, aunque existen prioridades. La educación básica debe ser universal, de calidad y accesible a todos, independiente de las condiciones socioeconómicas.

La Constitución colombiana tiene muy buenas definiciones sobre la educación como derecho y servicio y sobre las responsabilidades. La inversión del estado debe ser suficiente y sostenida. Pero no sólo es importante garantizar el gasto, es fundamental la eficiencia. Colombia invierte del orden del 4,64% del PIB, inferior a los países de alto desarrollo donde la cifra correspondiente es 5,6%, pero superior a Argentina y Chile que han sido tradicionalmente considerados

como más avanzados. El aumento de la participación de la educación en la inversión pública ha sido particularmente importante después de la Constitución del 91. La Figura 7.2 muestra la evolución de la cobertura bruta para los diferentes niveles. La desigualdad subsiste a pesar de los progresos. La cobertura neta en la educación media es de apenas el 27 %, con una desigualdad muy grande entre las ciudades y el campo y entre diferentes regiones. La Tabla 7.1 muestra las cifras de escolaridad por estrato socioeconómico. El número de años de escolaridad es prácticamente el doble para el estrato 5 que para el estrato 1. La calidad deja mucho que desear si se miran indicadores de distintas pruebas internacionales. Igualmente hay mucha diferencia entre los colegios privados y públicos. Hay que reconocer que las metas de los últimos gobiernos han sido ambiciosas tanto en cobertura como en calidad. Igualmente varias administraciones locales se han puesto como prioridad la educación.

La calidad es tan importante como la cobertura. El énfasis en la educación es en el aprendizaje, no en la enseñanza. Esto implica que los maestros y profesores deben recibir remuneración adecuada pero también que deben rendir cuentas, mostrar resultados. En particular es muy grave la discriminación por calidad. La preocupación sobre la calidad la quiero ilustrar con una anécdota personal. En una ocasión me metí en líos que afortunadamente no pasaron a mayores en un país con tanta violencia política como Colombia. Más tarde tuve la posibilidad de explicar la frase “no podemos convertir la universidad pública en una universidad de pobres” que ante un grupo de estudiantes muy comprometidos con la igualdad social y con la defensa de la oportunidad de acceso de los menos favorecidos a la educación superior sonó a todo lo contrario de lo que yo pretendía decir y fue bastante mal recibida.

No hay discriminación más odiosa que la de la calidad. Un sistema educativo propio de una sociedad muy desigual puede desarrollar una falsa idea de igualdad de oportunidades con dos estándares de calidad bien diferentes:

- Uno de alta calidad, con currículos, contenido, método y recursos de excelencia; alto nivel de exigencia a profesores y estudiantes; logro en el aprendizaje; administración eficiente; seguimiento de estándares de calidad; reconocimiento en el mundo del trabajo; costos totales altos que los pagan los estudiantes y por tanto es una educación de élite, a la cual no pueden acceder los niños y jóvenes de escasos recursos.
- El otro estándar, que denominé equivocadamente universidad de pobres, es accesible a menores costos para los estudiantes, tiene un currículo poco pertinente, contenidos y recursos (laboratorios, bibliotecas, salones, computadores) de segunda clase, poco o ningún nivel de exigencia a profesores y estudiantes, bajos niveles de aprendizaje, administración ineficiente, escaso rendimiento de cuentas a la sociedad, todo lo cual tarde

que temprano significará que los empleadores no aprecien a los egresados para las labores para las cuales supuestamente estudiaron y sólo los tengan en cuenta para empleos que no corresponden al nivel formal de educación, pero sí al nivel real. Los costos para la sociedad no necesariamente son bajos, normalmente son altos, provienen del presupuesto público.

De esta discriminación mediante la calidad resulta que la educación no es un mecanismo para desarrollar la igualdad, al contrario es un instrumento para perpetuarla. Es claro que la realidad no es tan simple como el esquema descrito con esos dos estándares. Pero en Colombia, tanto en la educación básica primaria y secundaria como en la universitaria, se adolece en alguna medida de este mal. Paradójicamente entre profesores y estudiantes, con lenguaje que suena progresista, se defienden reivindicaciones para eliminar o aflojar en los niveles de exigencia a profesores y estudiantes, lo que finalmente termina reforzando la discriminación.

En nuestro medio el acceso a la educación superior está restringido por razones de costo. En desarrollo de su función social el estado ofrece educación superior pública a costos subsidiados. La eficiencia de estas instituciones, la calidad de la educación que se imparte y la eficacia de los subsidios son asuntos de capital importancia para que esa inversión de dineros públicos tenga el impacto esperado.

Un aspecto muy importante de la contribución de la educación al desarrollo social es su aporte en la creación de una sociedad meritocrática, que es capaz de seleccionar sus líderes políticos y sus servidores por el mérito y la capacidad. Normalmente una sociedad tiene mayores dificultades y menores oportunidades de crecimiento integral cuando los líderes se seleccionan no por su talento, sino por su riqueza o aristocracia.

Es claro que en una sociedad con muchas desigualdades, las minorías más

Tabla 7.1: Promedio de años de escolaridad por estrato en Colombia para el año 2000. Tomada de [Montenegro and Rivas, 2005; pág. 165]

Estrato Socioeconómico	Años Promedio de Escolaridad
1	6,5
2	7,8
3	8,9
4	9,9
5	12,5

favorecidas tienen mayor posibilidad de acceso a la educación superior. Sin embargo, la educación pública puede contribuir significativamente para corregir la desigualdad de oportunidades. Para poder romper el círculo vicioso se requiere de la existencia de buenos sistemas de admisión, de asignación de costos de matrículas de acuerdo a la capacidad de pago, de ayuda académica a los grupos con desventajas, de búsqueda de la excelencia y de vigilancia contra la corrupción que puede resultar de los subsidios.

La admisión a la educación superior pública debe ser sólo por méritos y para ello se debe evaluar la aptitud, y no los conocimientos. Esto para corregir en parte una segregación muy injusta en la educación básica entre educación privada y pública que desafortunadamente se refleja en calidad.

La calidad es de muy difícil medición, sobre todo si se tiene en cuenta la definición integral que aquí se ha adoptado. Pero como en tantos otros campos es necesario trabajar con lo disponible, ser claros en las limitaciones y mantener los esfuerzos por algo mejor. No es productiva la posición que ante la complejidad del problema argumenta que no se debe medir. Como dicen los administradores, lo que no se mide no se administra.

Las herramientas empleadas tradicionalmente para medir la calidad son los resultados de pruebas estandarizadas que buscan evaluar las competencias desarrolladas por los estudiantes a medida que progresan por los diferentes niveles. Otro instrumento para trabajar sobre la calidad de la educación son los procesos de acreditación, que tienen la virtud de la definición de criterios por expertos, de la auto-evaluación y de la evaluación por pares externos.

A pesar de las evidentes limitaciones de estos instrumentos de medición es fundamental su adopción como instrumento para la asignación de los recursos estatales y como instrumento para mejorar el desempeño de estas instituciones.

7.5. Salud

Esta sección se basa en Bloom [2005]. Los cambios demográficos que se describieron en la Sección 7.1 tienen consecuencias importantes en la salubridad pública. En particular, la tendencia a la concentración de la población en las ciudades y en los países en desarrollo, el envejecimiento progresivo y la disminución del número de hijos por mujer tendrán impactos profundos. El panorama general de salubridad indica que las enfermedades crónicas como las cardiovasculares, el cáncer y la diabetes se han expandido a todo el mundo. Pero, las enfermedades infecciosas, aunque han perdido su preponderancia, no han desaparecido. Incluso hay enfermedades emergentes que se han constituido en amenazas importantes como resultado de la gran movilidad de personas y de la afectación antrópica sobre el medio ambiente (ver Tabla 7.2).

Respecto a la salud, tal vez con la excepción de África Sub-sahariana, el mundo está uniformizado, las diferencias son más sociales que entre países (Sección 7.2). Incluso en los Estados Unidos hay graves problemas de acceso a la prestación de salud básica como resultado de un sistema de seguridad social deficiente, con millones de personas sin seguro de salud. Como se señaló, el hambre, la desnutrición y las altas tasas de mortalidad infantil siguen siendo un problema de dimensión. Simultáneamente, la obesidad, la vida sedentaria, los malos hábitos de alimentación, el tabaco, el alcohol y las enfermedades mentales son críticas para el mundo desarrollado y la población más rica. En algunos casos con dimensión de epidemia. La esperanza de vida al nacer es un indicador del desarrollo humano que muestra las diferencias sociales de manera contundente. Por ejemplo en los Estados Unidos, la población de origen en los indios americanos tiene 13 años menos de esperanza de vida que los blancos. En promedio sólo el 76 % de los negros llega a los 65 años de edad, mientras que para los blancos la cifra correspondiente es del 85 %. Por países, regiones y en el tiempo las diferencias son significativas (ver Figura 7.3).

Recientemente, además de contabilizar las muertes y sus causas, se ha avanzado al desarrollar un método para medir la pérdida de años de vida sana por causa de enfermedades o por accidentalidad. La variable *AIA* mide los años de incapacidad ajustados y permite una comprensión mayor de la situación de salubridad, al incluir enfermedades incapacitantes, que no necesariamente causan la muerte (en inglés la sigla usada es *DALY*, correspondiente a disability adjusted life years). Por ejemplo, a nivel mundial, en el año 1999 se perdieron el equivalente a 1 400 millones de años por enfermedades no mortales mientras

Tabla 7.2: Enfermedades emergentes. Tomada de [Bloom, 2005; pág. 73]

1973	Rotavirus
1977	Virus Ébola
1977	Enfermedad de los legionarios
1981	Síndrome tóxico
1982	Enfermedad de Lyme
1983	SIDA
1991	Tuberculosis resistente
1993	Variedad 0139 del cólera
1994	Criptosporidium
1998	Gripe aviar
1999	Virus del Nilo
2003	Síndrome respiratorio agudo
2004	Virus Marbug

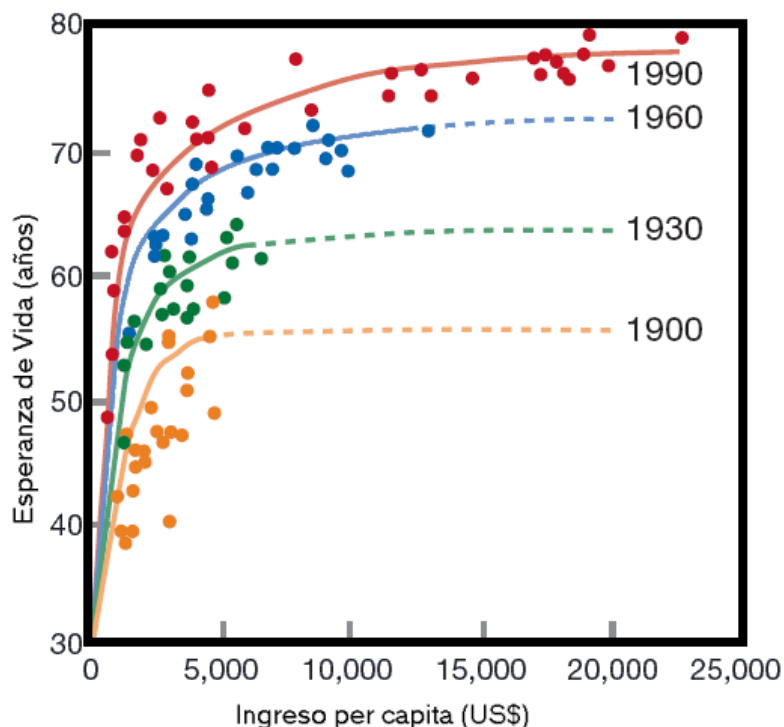


Figura 7.3: Relación entre esperanza de vida e ingreso per cápita en diferentes épocas. Tomada de Bloom [2005].

que el total de muertes fue de 56 millones. La estadística permite clasificar las principales causas de pérdida de años de vida sana y por tanto es un instrumento fundamental para orientar los recursos. La Tabla 7.3 muestra la situación para 1980 y la proyección para el 2020. Se aprecia la tendencia mencionada a aumentar la incidencia de las enfermedades crónicas y a la disminución de la de las enfermedades infecciosas. También es importante resaltar la participación de la accidentalidad vehicular. En Colombia está última es la segunda causa de muerte después de los homicidios.

No hay que ser muy inteligentes para diseñar una estrategia para enfrentar el reto moderno de la salud pública. La clave es la prevención, con los siguientes ingredientes: campañas masivas de vacunación, hasta lograr cobertura universal en los niños; nutrición adecuada y subsidiada para niños y mujeres embarazadas; hábitos de vida sana para todos (dieta, ejercicio y salud mental); campañas efectivas contra el consumo de tabaco (fundamentalmente en niños y jóvenes); prevención de riesgos ambientales para la salud; prevención de acci-

dentalidad vehicular con base a vías y vehículos más seguros, normas de tráfico que se cumplan; desarrollo de un sistema internacional de cooperación en salud; sistemas de seguridad social bien diseñados y administrados; investigación médica.

La relación beneficio–costo para una vacuna contra la difteria, el tétano y el tifo es de 29, para la vacuna contra la papera, el sarampión y la rubeola es 21. Ya se mencionaron las evaluaciones sobre los beneficios de la salud reproductiva. Las campañas educativas sobre el tabaco pueden ser muy efectivas, el 95 % de los jóvenes que no ha fumado a los 25 años de edad nunca lo hará. Los ingredientes fundamentales de tal campaña son el control a la publicidad, la adecuada difusión de la información sobre los riesgos que se derivan de su consumo y el despojarlo de roles simbólicos atractivos para la juventud.

Las reglas de propiedad intelectual, que por un lado garantizan la posibilidad de financiamiento de la investigación pero que han derivado en monopolio y restricción inaceptable al acceso a las medicinas por razones de precios, seguramente requieren revisión.

Respecto a los sistemas de seguridad pública caben discusiones semejantes a las que se dan con relación a la educación. No corresponde con los intereses públicos, ni siquiera con los intereses de los trabajadores de la salud, una sistema de salubridad pública de mala calidad, mal administrado. En países con altos niveles de desempleo, la solidaridad para garantizar cobertura universal en salud es imprescindible, con financiación vía impuestos en los que los más ricos tributan más y con contribuciones de los trabajadores en general (ver Sección A.3).

Tabla 7.3: Causas principales de pérdida de años ajustados de vida sana (AIA). Tomada de [Bloom, 2005; pág. 73]

Orden	1990	2020
1	Infecciones respiratorias	Enfermedad coronaria
2	Diarrea	Depresión mental
3	Enfermedades de nacimiento	Accidentalidad vehicular
4	Depresión mental	Trombosis
5	Enfermedad coronaria	Enfisema y bronquitis
6	Trombosis	Infecciones respiratorias
7	Tuberculosis	Tuberculosis
8	Sarampión	Guerra
9	Accidentalidad vehicular	Diarrea
10	Defectos congénitos	SIDA

7.6. Nueva Economía

La frase que mejor resume el planteamiento de esta sección es de Brown [2006]: “*El socialismo fracasó porque sus precios no decían la verdad económica, el capitalismo puede fracasar porque sus precios no dicen la verdad ambiental*”. Los precios deben decir la verdad económica, ambiental y social. La “verdad” económica en el sentido de asignación eficiente de recursos, que permita por ejemplo una adecuada selección de tecnología. Pero hay necesidad de involucrar otros criterios, sobre todo en lo que tiene que ver con las externalidades, los bienes públicos y comunes.

En la secciones anteriores de este Capítulo se han tratado varios temas que tienen que ver con Economía. Algunos de ellos fundamentales, como el concepto de desarrollo y las inter-relaciones entre sus diferentes componentes, otros importantes como los mercados y la necesidad de que sean realmente abiertos, otros más puntuales como las patentes y las deformaciones monopolistas en las que se ha incurrido. También en el Capítulo 5 sobre el agua y en las Secciones A.5 y A.4 sobre externalidades y la tragedia de los comunes se han tratado los conceptos de bienes públicos y comunes, y las dificultades que tienen las actuales instituciones económicas con ellos. En esta sección el énfasis es sobre propuestas alternativas o complementarias para hacer más eficiente la política económica en estos casos.

La teoría económica y en consecuencia las políticas fiscales actuales se desarrollaron en una época en la cual la prioridad era aprovechar los recursos naturales, que se asumían ilimitados. La mayoría de las veces tal hipótesis era implícita y no correspondía a una construcción teórica. Georgescu-Roegen [1971] ya había iniciado la crítica. Recientemente, ante la evidencia del agotamiento en varios campos han aparecido propuestas de reestructuración de la teoría económica [Gibbs, 2005; Dasgupta, 2001; Arrow et al., 1995; Daly and Farley, 2004; Daly, 2005]. Aunque la comunidad académica ha sido lenta para enfrentar los nuevos desafíos y en algunos casos hasta reactiva. Lo que está en juego es el concepto de desarrollo sostenible.

La preocupación viene de ejemplos como el de la pesca, para los cuales no es posible mantener el crecimiento de la producción por agotamiento del recurso natural (ver Sección 6.6). Los economistas por mucho tiempo han sostenido que los recursos naturales y los físicos son intercambiables o sustituibles. Pero el ejemplo de la pesca muestra claramente que más y mejores flotas pesqueras no pueden reemplazar la falta de peces. Para la gran mayoría de ramas de la economía, los precios transmiten la señal a los productores de cuando no es económico continuar la expansión. Pero para algunos recursos, los bienes comunes y públicos en particular, la señal no funciona. La respuesta tradicional a este problema ha sido poner en manos del Estado la regulación necesaria.

Pero para la atmósfera como depósito de CO₂ o el mar, el asunto trasciende los estados y es de naturaleza global.

En el reporte de la Comisión Brutland de 1987, se define desarrollo sostenible como aquel que permite satisfacer las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las próximas generaciones para satisfacer las suyas. Cada generación le debe pasar a la siguiente una riqueza per cápita al menos igual a la que recibió. Riqueza per cápita que debe involucrar la totalidad de la base productiva, es decir, el capital físico (infraestructura, maquinaria, materiales, bienes y servicios), el capital humano (conocimiento, tecnología, destreza laboral), el capital social (costumbres, reglas, leyes e instituciones) y el capital natural. La contabilidad de algunas de las componentes puede ser más complicada que la de otras. Algunos amigos de la sostenibilidad van más allá e indican que no sólo el total de la riqueza recibida per cápita debe garantizarse a las próximas generaciones, sino que el capital natural considerado aisladamente también. Esta forma de sostenibilidad más fuerte se apoya en el concepto de que no hay ninguna posibilidad de substituir el capital natural con el capital producido por el hombre. En el fondo de esta polémica hay una discusión sobre la valoración del capital natural.

Cuando se incorpora el deterioro del capital natural a las cuentas nacionales se encuentra que los países para los cuales su producto interno bruto per cápita (PIBPC) ha venido decreciendo también están destruyendo su capital natural (varios casos en África subsahariana). Los datos son del Banco Mundial que incorpora disminución de los recursos energéticos, y deterioro de la atmósfera como un sumidero de CO₂ y de los bosques como fuente de muchos servicios. Pero incluso en la India, que tiene tasas de crecimiento del PIBC importantes, la incorporación del deterioro del capital natural arroja cifras negativas para la riqueza total. Tanto para China como para la mayoría de los países desarrollados las cifras todavía son positivas. Pero en estas evaluaciones falta incluir el deterioro de los recursos hídricos, los suelos, la biodiversidad y la pesca.

Entre las alternativas propuestas para enfrentar el agotamiento están las leyes y reglamentos, que pueden incluir prohibiciones. Para ciertos casos es la única alternativa. Los ejemplos extremos ilustran esta necesidad: no se puede permitir bajo ninguna eventualidad el envenenamiento de las fuentes de agua. Pero las prohibiciones no funcionan para la mayoría de los casos.

Otra alternativa es la de orientar la actividad privada mediante impuestos y subsidios [Brown, 2006; USCBO, 2003]. Entre las ventajas de esta alternativa está el que se usa el mercado, reforzando su fortaleza mayor que es la asignación eficiente de recursos. La modificación de los precios finales para consumidores y productores se reflejará en una diferente asignación de recursos, que en principio corresponde mejor a los intereses comunes. El gran desafío es que los precios reflejen los beneficios y costos indirectos, de tal manera que

se incentiven las actividades favorables para el ambiente y se desincentiven las desfavorables.

Entre las actividades a tasar están: la emisión de CO₂ mediante impuestos a los automóviles privados, o a la gasolina y demás combustibles fósiles; la disposición de tóxicos; el uso de materias primas no renovables; el consumo de productos perjudiciales para la salud como los cigarrillos y el alcohol; los productos desechables; el uso de pesticidas y otros químicos con efectos colaterales; la generación de basura.

Los ingresos de estos impuestos se pueden emplear para subsidiar actividades consideradas benéficas desde la perspectiva común o para disminuir los impuestos que se pagan actualmente al ingreso (impuesto a la renta) o al consumo (impuesto al valor agregado).

Entre las actividades candidatas a recibir subsidios están: la generación eficiente de electricidad y el desarrollo de otras fuentes renovables de energía, el uso eficiente de la energía y el agua; reciclado de materiales; el transporte público, las obras urbanas favorables al peatón y a formas limpias de transporte como la bicicleta; la reforestación; la conservación de la biodiversidad; la investigación en todas estas áreas.

Los mayores argumentos en contra de esta alternativa son la dificultad en la determinación del monto de los impuestos y los subsidios, y las oportunidades de corrupción y tráfico de influencias que se genera. En principio, si fuera posible una valoración técnica de los costos o beneficios asociados a las externalidades, ésta sería la manera de definir los montos. Respecto a los subsidios, pocas políticas públicas son tan impopulares en teoría como tan populares en la práctica. Pero ya hay muchos en ejercicio que se deberían eliminar: los subsidios a los carros, a la gasolina, a las carreteras, a la deforestación, la pesca, la minería, el riego, el uso de fertilizantes y pesticidas.

El problema es que los grupos de interés se organizan y ejercen presión legítima, mientras que el interés general está más diluido y no tiene quien los represente. La magnitud de los beneficios o costos por individuo es mucho mayor para los grupos de interés, lo que explica su organización y movilización. Los beneficios o costos son menores para cada individuo de la comunidad general, lo que explica su indiferencia. Sin embargo el total de los beneficios o costos es mucho mayor para el común. El sistema tiene por lo tanto una base débil y es susceptible de ser manipulado por los grupos de interés, que defenderán sus subsidios, y rechazarán los impuestos que los perjudican.

Otra estrategia novedosa, que ha ganado popularidad entre los economistas y de la que se tienen algunas experiencias positivas es la de fijar un límite físico a la explotación —o a la emisión según el caso—, asignar permisos mediante algún mecanismo y crear un mercado en el que se intercambien los permisos. El mercado fija los precios, y el gobierno fija las cantidades con base en estudios

técnicos. La asignación inicial puede ser al azar, o puede hacerse mediante subasta.

Entre las experiencias de aplicación de la estrategia de permisos transables está la de emisión de bióxido de azufre en los Estados Unidos para la reducción de la lluvia ácida, manejada por la EPA (Environmental Protection Agency). El mercado que se desarrolló ha sido muy eficiente, igual que los mecanismos de medición y seguimiento a las emisiones, más no así la definición de los límites físicos que se hizo de manera muy rígida. Actualmente está en sus primeras etapas de desarrollo un mercado de permisos de emisión de CO₂ en el cual se supone que los países que no pueden cumplir con sus cuotas de reducción deben comprarle a quienes sí lo hicieron, o no tienen restricción.

Un ingrediente que no puede faltar en estas recetas es el manejo de la incertidumbre. Las medidas deben ser lo suficientemente flexibles para corregir en la medida que se allegue conocimiento en cualquier dirección y que la incertidumbre disminuya.

Otra posibilidad para incentivar el desarrollo sostenible es mediante las certificaciones ecológicas. Por ejemplo en el uso de productos reciclados, o derivados de un aprovechamiento sostenible de los bosques, o que no involucran sustancias químicas nocivas. Eventualmente los costos de tales productos certificados pueden ser mayores, pero se da la opción a los consumidores de que voten con su billetera. Los mecanismos de certificación necesitan un sistema técnicamente diseñado y posibilidad de verificación. Entre los ejemplos está la electricidad producida mediante fuentes limpias, la certificación sobre la eficiencia en electrodomésticos y demás productos que usan energía o agua de manera eficiente, la certificación para madera proveniente de plantaciones, pescado de criaderos o proyectos sostenibles, comida orgánica. Hay diversas experiencias exitosas en este sentido.

Algunos de los elementos de estas políticas pueden significar cambios a los mecanismos de intercambio internacional, en particular los impuestos y los subsidios, la incorporación de externalidades. La dificultad proviene de la desigual manera como estos elementos se incorporan en las distintas economías.

7.7. Acelerando la Transición

¿Adónde va a caer este globo? ¿Las cosas seguirán igual, van a empeorar o hay una oportunidad para mejorar? La posibilidad de seguir igual, aunque muy socorrida, tal vez apoyada en la filosofía de Parménides o en un cinismo vulgar, es la menos factible.

Uno no se baña dos veces en el mismo río, el río está cambiando, nosotros estamos cambiando, el río nos está cambiando y nosotros estamos cambiando el

río. Cualquiera de los temas tratados en este panorama del planeta es suficiente para demostrar esta afirmación.

Las cifras sobre la población son abrumadoras. Ni aunque quisiéramos podríamos seguir igual, durante los próximos 50 años cada semana en los países en desarrollo se va a necesitar el equivalente a una ciudad nueva de un millón de habitantes. Tampoco queremos que esos 1 000 millones que todavía tienen sus necesidades básicas insatisfechas sigan igual. Los bosques, la biodiversidad parece que serán un recuerdo. Algunos creemos, apoyados en las mejores observaciones y el mejor conocimiento que tenemos, que el clima está cambiando y que las consecuencias no van a ser leves.

Definitivamente el río no es el mismo, la opción de que todo seguirá igual es en el mejor de los casos un vano consuelo para quienes no están dispuestos a enfrentar los desafíos. Sin duda habrá cambio, no sabemos cuál. Además, a menos que lo construyamos, será para empeorar.

Pero el tono de esta obra no ha sido ni quiere ser pesimista ni alarmista. Tenemos una profunda convicción positiva del futuro. Las palabras de Bertrand Russel en su último manuscrito son una inspiración para muchos (ver el Prefacio). En cada uno de nosotros hay un artista encarcelado que tenemos que liberar para que lleve alegría por todas partes. Dado mi desconocimiento del arte moderno, yo le agregaría que ese artista debe ser como los del renacimiento, que eran a la vez científicos. Con esa palanca y ese punto de apoyo podemos cambiar el mundo.

Nuestra propuesta para la Tierra comprende el desarrollo como ampliación de las libertades, igualdad de oportunidades para todos mediante nutrición básica y educación universal, equidad de género y capacidad de decisión libre y responsable sobre la procreación, recomposición de la base energética sobre alternativas más limpias y eficientes, transporte público en lugar del automóvil, economía del reuso y reciclado de materiales en lugar de la del desperdicio y los desechables, mejora en la eficiencia del uso del agua, aprovechamiento sostenible de los bosques, ciudades para los ciudadanos, precios que incluyan la señal de los costos ambientales, salud preventiva, desarrollo científico, tecnológico, profundización de la democracia, desarrollo de la gobernabilidad global. En resumen desarrollo integral sostenible.

Cada uno de estos ingredientes de la propuesta necesita desarrollo, conocimiento, detalle, tener las bases muy firmes. También requiere imaginación y creatividad. Requiere de artistas-científicos, de diálogo e interacción permanente entre ambos.

La urgencia mayor es la social. Se requiere un plan social de choque para atender las necesidades más apremiantes, en la misma línea de la Declaración del Milenio de las Naciones Unidas, pero incluso más ambiciosa en algunos aspectos. Brown [2006] ha cuantificado un plan semejante en menos del 15 %

del gasto militar anual. Tal plan es factible, el único factor crítico es la voluntad política.

7.8. Ejercicios

7.8.1. La Declaración del Milenio de las Naciones Unidas (ver Sección A.1) ha sido resumida en 8 objetivos y 48 indicadores. Seleccione un indicador, discuta su pertinencia para el objetivo correspondiente, evalúe el desempeño de Colombia. Use análisis histórico, haga comparación con al menos otros dos países o regiones, discuta políticas y planes relacionados, haga proyecciones. <http://www.developmentgoals.org>

7.8.2. El llamado Consenso de Copenhagen [Lomborg, 2006] fue un ejercicio en el cual se reunieron las mejores mentes para hacer diagnóstico y propuestas sobre diferentes componentes de la situación global actual. Seleccione un tema de su interés, consulte el reporte disponible en Internet y haga un balance crítico.

7.8.3. Colombia cumple 200 años como país independiente en el 2019. Para conmemorar la ocasión, Planeación Nacional desarrolló el llamado Plan 2019. Consulte el documento y haga un análisis crítico desde una de las perspectivas desarrolladas en este libro. Por ejemplo, respecto a población, o a educación.

7.8.4. La tasa actual de crecimiento anual de la población en Colombia se estima en 1,68%. Actualice esta cifra con los datos del último censo, mire su evolución histórica, los factores que la determinan, compare con la de otros países, analice su variación regional. Realice un análisis semejante para la tasa de fecundidad, que se estima actualmente en 2,6 hijos por mujer, la tasa de natalidad en 2,06%, la tasa de mortalidad en 0,55%, la tasa de mortalidad infantil en 2,56% y la esperanza de vida en 72,2 años. Consulte sobre las políticas de población actuales y en el pasado, en particular en Visión Colombia Segundo Centenario: 2019 y [Montenegro and Rivas, 2005; pág. 119].

7.8.5. La distribución del ingreso se mide de diferentes maneras, mediante el porcentaje del ingreso total que recibe el quintil más rico, o el más pobre, o mediante la curva de Lorenz (la distribución acumulada expresada en porcentaje acumulado de la población que tiene un determinado ingreso, también en porcentaje. Para dibujar la curva la distribución se grafica en el eje vertical y la población en el eje horizontal), o mediante el coeficiente Gini (área entre la diagonal y la curva de Lorenz). También se mide la pobreza y la pobreza absoluta en términos del porcentaje de personas con ingresos menores que 2 y 1 dólar al día respectivamente. Consulte estas definiciones y su interpretación. Compare

las cifras de Colombia en el tiempo y con respecto a otros países. La hipótesis de Kuznets sostiene que al principio el desarrollo trae una distribución más inequitativa, Gini más alto, pero que llega un momento en que se estabiliza y luego empieza a decrecer, como una U invertida. Discute esta hipótesis, las observaciones que la soportan y las que van en contra [Montenegro and Rivas, 2005; pág. 19].

7.8.6. En algún libro de micro-economía consulte las curvas de oferta y demanda, los mecanismos del mercado de libre competencia para la fijación de los precios, el concepto de elasticidad, la competencia monopolista y las externalidades. Aplique los conceptos a su profesión.

7.8.7. Consulte acerca del mercado de CO₂. Cuáles son las posibilidades para Colombia.

7.8.8. La tasa de interés o de descuento refleja la diferente valoración que las personas asignan al ingreso según el momento que lo reciban. En general las personas prefieren un ingreso hoy, al mismo ingreso dentro de un año. Mediante la tasa de descuento es posible comparar ingresos en diferentes épocas para hacer valoraciones económicas dinámicas. Mientras mayor preferencia se tiene por el ingreso actual mayor es la tasa de descuento. En términos generales, de la mano con la tasa de descuento van el consumo, el ahorro y la inversión. A una alta tasa corresponde mayor consumo actual, menos ahorro e inversión. La tasa de interés del mercado balancea la oferta y demanda por ahorro de todos los actores económicos. La tasa de interés también representa la tasa marginal de retorno de las inversiones. Consulte sobre estos conceptos, precise algunas de las afirmaciones anteriores. Para las decisiones colectivas de largo plazo se argumenta que no se puede usar la tasa de descuento del mercado y que es necesario involucrar otros principios, como el balance intergeneracional. Incluso, para algunos economistas la tasa de descuento para el capital natural es un despropósito Georgescu-Roegen [1971]. Profundice sobre este tema.

APÉNDICE A

Lecturas

A.1. Declaración del Milenio, Naciones Unidas

Asamblea General de las Naciones Unidas.

Resolución 55/2 13 de septiembre de 2000

Quincuagésimo quinto período de sesiones

Declaración del Milenio

La Asamblea General Aprueba la siguiente Declaración: Declaración del Milenio

I Valores y principios

1. Nosotros, Jefes de Estado y de Gobierno, nos hemos reunido en la Sede de las Naciones Unidas en Nueva York del 6 al 8 de septiembre de 2000, en los albores de un nuevo milenio, para reafirmar nuestra fe en la Organización y su Carta como cimientos indispensables de un mundo más pacífico, más próspero y más justo.
2. Reconocemos que, además de las responsabilidades que todos tenemos respecto de nuestras sociedades, nos incumbe la responsabilidad colectiva de respetar y defender los principios de la dignidad humana, la igualdad y la equidad en el plano mundial. En nuestra calidad de dirigentes, tenemos, pues, un deber que cumplir respecto de todos los habitantes del planeta, en especial los más vulnerables y, en particular, los niños del mundo, a los que pertenece el futuro.

3. Reafirmamos nuestra adhesión a los propósitos y principios de la Carta de las Naciones Unidas, que han demostrado ser intemporales y universales. A decir verdad, su pertinencia y su capacidad como fuente de inspiración han ido en aumento conforme se han multiplicado los vínculos y se ha consolidado la interdependencia entre las naciones y los pueblos.
4. Estamos decididos a establecer una paz justa y duradera en todo el mundo, de conformidad con los propósitos y principios de la Carta. Reafirmamos nuestra determinación de apoyar todos los esfuerzos encaminados a hacer respetar la igualdad soberana de todos los Estados, el respeto de su integridad territorial e independencia política; la solución de los conflictos por medios pacíficos y en consonancia con los principios de la justicia y del derecho internacional; el derecho de libre determinación de los pueblos que siguen sometidos a la dominación colonial y la ocupación extranjera; la no injerencia en los asuntos internos de los Estados; el respeto de los derechos humanos y las libertades fundamentales; el respeto de la igualdad de derechos de todos, sin distinciones por motivo de raza, sexo, idioma o religión, y la cooperación internacional para resolver los problemas internacionales de carácter económico, social, cultural o humanitario.
5. Creemos que la tarea fundamental a que nos enfrentamos hoy es conseguir que la mundialización se convierta en una fuerza positiva para todos los habitantes del mundo, ya que, si bien ofrece grandes posibilidades, en la actualidad sus beneficios se distribuyen de forma muy desigual al igual que sus costos. Reconocemos que los países en desarrollo y los países con economías en transición tienen dificultades especiales para hacer frente a este problema fundamental. Por eso, consideramos que solo desplegando esfuerzos amplios y sostenidos para crear un futuro común, basado en nuestra común humanidad en toda su diversidad, se podrá lograr que la mundialización sea plenamente incluyente y equitativa. Esos esfuerzos deberán incluir la adopción de políticas y medidas, a nivel mundial, que correspondan a las necesidades de los países en desarrollo y de las economías en transición y que se formulen y apliquen con la participación efectiva de esos países y esas economías.
6. Consideramos que determinados valores fundamentales son esenciales para las relaciones internacionales en el siglo XXI:
 - **La libertad.** Los hombres y las mujeres tienen derecho a vivir su vida y a criar a sus hijos con dignidad y libres del hambre y del temor a la violencia, la opresión o la injusticia. La mejor forma

de garantizar esos derechos es contar con gobiernos democráticos y participativos basados en la voluntad popular.

- **La igualdad.** No debe negarse a ninguna persona ni a ninguna nación la posibilidad de beneficiarse del desarrollo. Debe garantizarse la igualdad de derechos y oportunidades de hombres y mujeres.
- **La solidaridad.** Los problemas mundiales deben abordarse de manera tal que los costos y las cargas se distribuyan con justicia, conforme a los principios fundamentales de la equidad y la justicia social. Los que sufren, o los que menos se benefician, merecen la ayuda de los más beneficiados.
- **La tolerancia.** Los seres humanos se deben respetar mutuamente, en toda su diversidad de creencias, culturas e idiomas. No se deben temer ni reprimir las diferencias dentro de las sociedades ni entre éstas; antes bien, deben apreciarse como preciados bienes de la humanidad. Se debe promover activamente una cultura de paz y diálogo entre todas las civilizaciones.
- **El respeto de la naturaleza.** Es necesario actuar con prudencia en la gestión y ordenación de todas las especies vivas y todos los recursos naturales, conforme a los preceptos del desarrollo sostenible. Sólo así podremos conservar y transmitir a nuestros descendientes las incommensurables riquezas que nos brinda la naturaleza. Es preciso modificar las actuales pautas insostenibles de producción y consumo en interés de nuestro bienestar futuro y en el de nuestros descendientes.
- **Responsabilidad común.** La responsabilidad de la gestión del desarrollo económico y social en el mundo, lo mismo que en lo que hace a las amenazas que pesan sobre la paz y la seguridad internacionales, debe ser compartida por las naciones del mundo y ejercerse multilateralmente. Por ser la organización más universal y más representativa de todo el mundo, las Naciones Unidas deben desempeñar un papel central a ese respecto.

7. Para plasmar en acciones estos valores comunes, hemos formulado una serie de objetivos clave a los que atribuimos especial importancia.

II La paz, la seguridad y el desarme

8. No escatimaremos esfuerzos para liberar a nuestros pueblos del flagelo de la guerra —ya sea dentro de los Estados o entre éstos—, que, en el último decenio, ha cobrado más de cinco millones de vidas. También

procuraremos eliminar los peligros que suponen las armas de destrucción en masa.

9. Por todo lo anterior, decidimos:

- Consolidar el respeto del imperio de la ley en los asuntos internacionales y nacionales y, en particular, velar por que los Estados Miembros cumplan las decisiones de la Corte Internacional de Justicia, con arreglo a la Carta de las Naciones Unidas, en los litigios en que sean partes.
- Aumentar la eficacia de las Naciones Unidas en el mantenimiento de la paz y de la seguridad, dotando a la Organización de los recursos y los instrumentos que necesitan en sus tareas de prevención de conflictos, resolución pacífica de controversias, mantenimiento de la paz, consolidación de la paz y reconstrucción después de los conflictos. En este sentido, tomamos nota del informe del Grupo sobre las Operaciones de Paz de las Naciones Unidas ¹, y pedimos a la Asamblea General que examine cuanto antes sus recomendaciones.
- Fortalecer la cooperación entre las Naciones Unidas y las organizaciones regionales, de conformidad con las disposiciones del Capítulo VIII de la Carta.
- Velar por que los Estados Partes apliquen los tratados sobre cuestiones tales como el control de armamentos y el desarme, el derecho internacional humanitario y el relativo a los derechos humanos, y pedir a todos los Estados que consideren la posibilidad de suscribir y ratificar el Estatuto de Roma de la Corte Penal Internacional².
- Adoptar medidas concertadas contra el terrorismo internacional y adherirnos cuanto antes a todas las convenciones internacionales pertinentes.
- Redoblar nuestros esfuerzos para poner en práctica nuestro compromiso de luchar contra el problema mundial de la droga.
- Intensificar nuestra lucha contra la delincuencia transnacional en todas sus dimensiones, incluidos la trata y el contrabando de seres humanos y el blanqueo de dinero.
- Reducir al mínimo las consecuencias negativas que las sanciones económicas impuestas por las Naciones Unidas pueden tener en las

¹A/55/305-S/2000/809; véase Documentos Oficiales del Consejo de Seguridad, quincuagésimo quinto año, Suplemento de julio, agosto y septiembre de 2000, documento S/2000/809.

²A/CONF.183/9.

poblaciones inocentes, someter los regímenes de sanciones a exámenes periódicos y eliminar las consecuencias adversas de las sanciones sobre terceros.

- Esforzarnos por eliminar las armas de destrucción en masa, en particular las armas nucleares, y mantener abiertas todas las opciones para alcanzar esa meta, incluida la posibilidad de convocar una conferencia internacional para determinar formas adecuadas de eliminar los peligros nucleares.
 - Adoptar medidas concertadas para poner fin al tráfico ilícito de armas pequeñas y armas ligeras, en particular dando mayor transparencia a las transferencias de armas y respaldando medidas de desarme regional, teniendo en cuenta todas las recomendaciones de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio Ilícito de Armas Pequeñas y Ligeras.
 - Pedir a todos los Estados que consideren la posibilidad de adherirse a la Convención sobre la prohibición del empleo, almacenamiento, producción y transferencia de minas antipersonal y sobre su destrucción³, así como al Protocolo enmendado relativo a las minas de la Convención sobre armas convencionales⁴.
10. Instamos a los Estados Miembros a que observen la Tregua Olímpica, individual y colectivamente, ahora y en el futuro, y a que respalden al Comité Olímpico Internacional en su labor de promover la paz y el entendimiento humano mediante el deporte y el ideal olímpico.

III El desarrollo y la erradicación de la pobreza

11. No escatimaremos esfuerzos para liberar a nuestros semejantes, hombres, mujeres y niños, de las condiciones abyectas y deshumanizadoras de la pobreza extrema, a la que en la actualidad están sometidos más de 1.000 millones de seres humanos. Estamos empeñados en hacer realidad para todos ellos el derecho al desarrollo y a poner a toda la especie humana al abrigo de la necesidad.
12. Resolvemos, en consecuencia, crear en los planos nacional y mundial un entorno propicio al desarrollo y a la eliminación de la pobreza.
13. El logro de esos objetivos depende, entre otras cosas, de la buena gestión de los asuntos públicos en cada país. Depende también de la buena gestión de los asuntos públicos en el plano internacional y de la transparencia

³Véase CD/1478.

⁴Protocolo enmendado sobre prohibiciones o restricciones del empleo de minas, armas trampa y otros artefactos [CCW/CONF.I/16 (Part I), anexo B].

de los sistemas financieros, monetarios y comerciales. Propugnamos un sistema comercial y financiero multilateral abierto, equitativo, basado en normas, previsible y no discriminatorio.

14. Nos preocupan los obstáculos a que se enfrentan los países en desarrollo para movilizar los recursos necesarios para financiar su desarrollo sostenible. Haremos, por consiguiente, todo cuanto esté a nuestro alcance para que tenga éxito la Reunión intergubernamental de alto nivel sobre la financiación del desarrollo que se celebrará en 2001.
15. Decidimos, asimismo, atender las necesidades especiales de los países menos adelantados. En este contexto, nos felicitamos de la convocación de la Tercera Conferencia de las Naciones Unidas sobre los Países Menos Adelantados, que se celebrará en mayo de 2001, y donde haremos todo lo posible por lograr resultados positivos. Pedimos a los países industrializados:
 - que adopten, preferiblemente antes de que se celebre esa Conferencia, una política de acceso libre de derechos y cupos respecto de virtualmente todas las exportaciones de los países menos adelantados;
 - que apliquen sin más demora el programa mejorado de alivio de la deuda de los países pobres muy endeudados y que convengan en cancelar todas las deudas bilaterales oficiales de esos países a cambio de que éstos demuestren su firme determinación de reducir la pobreza; y
 - que concedan una asistencia para el desarrollo más generosa, especialmente a los países que se están esforzando genuinamente por destinar sus recursos a reducir la pobreza.
16. Estamos decididos, asimismo, a abordar de manera global y eficaz los problemas de la deuda de los países de ingresos bajos y medios adoptando diversas medidas en los planos nacional e internacional para que su deuda sea sostenible a largo plazo.
17. Resolvemos asimismo atender las necesidades especiales de los pequeños Estados insulares en desarrollo poniendo en práctica rápida y cabalmente el Programa de Acción de Barbados⁵ y las conclusiones a que llegó la

⁵Programa de Acción para el desarrollo sostenible de los pequeños Estados insulares en desarrollo [Informe de la Conferencia Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo, Bridgetown (Barbados), 25 de abril a 6 de mayo de 1994 (publicación de las Naciones Unidas, No. de venta: S.94.I.18 y corrección), cap. I, resolución 1, anexo II].

Asamblea General en su vigésimo segundo período extraordinario de sesiones. Instamos a la comunidad internacional a que vele por que, cuando se prepare un índice de vulnerabilidad, se tengan en cuenta las necesidades especiales de los pequeños Estados insulares en desarrollo.

18. Reconocemos las necesidades y los problemas especiales de los países en desarrollo sin litoral, por lo que pedimos encarecidamente a los donantes bilaterales y multilaterales que aumenten su asistencia financiera y técnica a ese grupo de países para satisfacer sus necesidades especiales de desarrollo y ayudarlos a superar los obstáculos de su geografía, mejorando sus sistemas de transporte en tránsito.

19. Decidimos, asimismo:

- Reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de habitantes del planeta cuyos ingresos sean inferiores a un dólar por día y el de las personas que padezcan hambre; igualmente, para esa misma fecha, reducir a la mitad el porcentaje de personas que carezcan de acceso a agua potable o que no puedan costearlo.
- Velar por que, para ese mismo año, los niños y niñas de todo el mundo puedan terminar un ciclo completo de enseñanza primaria y por que tanto las niñas como los niños tengan igual acceso a todos los niveles de la enseñanza.
- Haber reducido, para ese mismo año, la mortalidad materna en tres cuartas partes y la mortalidad de los niños menores de 5 años en dos terceras partes respecto de sus tasas actuales.
- Para entonces, haber detenido y comenzado a reducir la propagación del VIH/SIDA, el flagelo del paludismo y otras enfermedades graves que afligen a la humanidad.
- Prestar especial asistencia a los niños huérfanos por causa del VIH/SIDA.
- Para el año 2020, haber mejorado considerablemente la vida de por lo menos 100 millones de habitantes de tugurios, como se propone en la iniciativa ‘Ciudades sin barrios de tugurios’.

20. Decidimos también:

- Promover la igualdad entre los sexos y la autonomía de la mujer como medios eficaces de combatir la pobreza, el hambre y las enfermedades y de estimular un desarrollo verdaderamente sostenible.

- Elaborar y aplicar estrategias que proporcionen a los jóvenes de todo el mundo la posibilidad real de encontrar un trabajo digno y productivo.
- Alentar a la industria farmacéutica a que aumente la disponibilidad de los medicamentos esenciales y los ponga al alcance de todas las personas de los países en desarrollo que los necesiten.
- Establecer sólidas formas de colaboración con el sector privado y con las organizaciones de la sociedad civil en pro del desarrollo y de la erradicación de la pobreza.
- Velar por que todos puedan aprovechar los beneficios de las nuevas tecnologías, en particular de las tecnologías de la información y de las comunicaciones, conforme a las recomendaciones formuladas en la Declaración Ministerial 2000 del Consejo Económico y Social⁶.

IV Protección de nuestro entorno común

22. No debemos escatimar esfuerzos por liberar a toda la humanidad, y ante todo a nuestros hijos y nietos, de la amenaza de vivir en un planeta irremediablemente dañado por las actividades del hombre, y cuyos recursos ya no alcancen para satisfacer sus necesidades.
23. Reafirmamos nuestro apoyo a los principios del desarrollo sostenible, incluidos los enunciados en el Programa 21⁷, convenidos en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.
24. Decidimos, por consiguiente, adoptar una nueva ética de conservación y resguardo en todas nuestras actividades relacionadas con el medio ambiente y, como primer paso en ese sentido, convenimos en lo siguiente:
 - Hacer todo lo posible por que el Protocolo de Kyoto entre en vigor, de ser posible antes del décimo aniversario de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, en el año 2002, e iniciar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
 - Intensificar nuestros esfuerzos colectivos en pro de la ordenación, la conservación y el desarrollo sostenible de los bosques de todo tipo.

⁶E/2000/L.9.

⁷Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río de Janeiro, 3 a 14 de junio de 1992 (publicación de las Naciones Unidas, No. de venta: S.93.I.8 y correcciones), vol. I: Resoluciones aprobadas por la Conferencia, resolución 1, anexo II.

- Insistir en que se apliquen cabalmente el Convenio sobre la Diversidad Biológica⁸ y la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África⁹.
- Poner fin a la explotación insostenible de los recursos hídricos formulando estrategias de ordenación de esos recursos en los planos regional, nacional y local, que promuevan un acceso equitativo y un abastecimiento adecuado.
- Intensificar la cooperación con miras a reducir el número y los efectos de los desastres naturales y de los desastres provocados por el hombre.
- Garantizar el libre acceso a la información sobre la secuencia del genoma humano.

V Derechos humanos, democracia y buen gobierno

25. No escatimaremos esfuerzo alguno por promover la democracia y fortalecer el imperio del derecho y el respeto de todos los derechos humanos y las libertades fundamentales internacionalmente reconocidos, incluido el derecho al desarrollo. 25. Decidimos, por tanto:

- Respetar y hacer valer plenamente la Declaración Universal de Derechos Humanos¹⁰.
- Esforzarnos por lograr la plena protección y promoción de los derechos civiles, políticos, económicos, sociales y culturales de todas las personas en todos nuestros países.
- Aumentar en todos nuestros países la capacidad de aplicar los principios y las prácticas de la democracia y del respeto de los derechos humanos, incluidos los derechos de las minorías.
- Luchar contra todas las formas de violencia contra la mujer y aplicar la Convención sobre la eliminación de todas las formas de discriminación contra la mujer¹¹.
- Adoptar medidas para garantizar el respeto y la protección de los derechos humanos de los migrantes, los trabajadores migratorios y

⁸Véase Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Convenio sobre la Diversidad Biológica (Centro de Actividades del Programa de Derecho e Instituciones Relacionados con el Medio Ambiente), junio de 1992.

⁹A/49/84/Add.2, anexo, apéndice II.

¹⁰Resolución 217 A (III).

¹¹Resolución 34/180, anexo.

sus familias, eliminar los actos de racismo y xenofobia cada vez más frecuentes en muchas sociedades y promover una mayor armonía y tolerancia en todas las sociedades.

- Trabajar aunadamente para lograr procesos políticos más igualitarios, en que puedan participar realmente todos los ciudadanos de nuestros países.
- Garantizar la libertad de los medios de difusión para cumplir su indispensable función y el derecho del público a la información.

VI Protección de las personas vulnerables

26. No escatimaremos esfuerzos para lograr que los niños y todas las poblaciones civiles que sufren de manera desproporcionada las consecuencias de los desastres naturales, el genocidio, los conflictos armados y otras situaciones de emergencia humanitaria reciban toda la asistencia y la protección que necesiten para reanudar cuanto antes una vida normal. Decidimos, por consiguiente:

- Ampliar y reforzar la protección de los civiles en situaciones de emergencia complejas, de conformidad con el derecho internacional humanitario.
- Fortalecer la cooperación internacional, incluso compartiendo la carga que recae en los países que reciben refugiados y coordinando la asistencia humanitaria prestada a esos países; y ayudar a todos los refugiados y personas desplazadas a regresar voluntariamente a sus hogares en condiciones de seguridad y dignidad, y a reintegrarse sin tropiezos en sus respectivas sociedades.
- Alentar la ratificación y la plena aplicación de la Convención sobre los Derechos del Niño¹² y sus protocolos facultativos relativos a la participación de niños en los conflictos armados y a la venta de niños, la prostitución infantil y la utilización de niños en la pornografía¹³.

VII Atención a las necesidades especiales de África

27. Apoyaremos la consolidación de la democracia en África y ayudaremos a los africanos en su lucha por conseguir una paz duradera, erradicar la pobreza y lograr el desarrollo sostenible, para que de esa forma África pueda integrarse en la economía mundial.

¹²Resolución 44/25, anexo.

¹³Resolución 54/263, anexos I y II.

28. Decidimos, por tanto:

- Apoyar plenamente las estructuras políticas e institucionales de las nuevas democracias de África.
- Fomentar y mantener mecanismos regionales y subregionales de prevención de conflictos y promoción de la estabilidad política, y velar por que las operaciones de mantenimiento de la paz en ese continente reciban una corriente segura de recursos.
- Adoptar medidas especiales para abordar los retos de erradicar la pobreza y lograr el desarrollo sostenible en África, tales como cancelar la deuda, mejorar el acceso a los mercados, aumentar la asistencia oficial para el desarrollo e incrementar las corrientes de inversión extranjera directa y de transferencia de tecnología.
- Ayudar a África a aumentar su capacidad para hacer frente a la propagación de la pandemia del VIH/SIDA y otras enfermedades infecciosas.

VIII Fortalecimiento de las Naciones Unidas

29. No escatimaremos esfuerzos por hacer de las Naciones Unidas un instrumento más eficaz en el logro de todas las prioridades que figuran a continuación: la lucha por el desarrollo de todos los pueblos del mundo; la lucha contra la pobreza, la ignorancia y las enfermedades; la lucha contra la injusticia; la lucha contra la violencia, el terror y el delito; y la lucha contra la degradación y la destrucción de nuestro planeta.

30. Decidimos, por consiguiente:

- Reafirmar el papel central que recae en la Asamblea General en su calidad de principal órgano de deliberación, adopción de políticas y representación de las Naciones Unidas, y capacitarla para que pueda desempeñar ese papel con eficacia.
- Redoblar nuestros esfuerzos por reformar ampliamente el Consejo de Seguridad en todos sus aspectos.
- Fortalecer más el Consejo Económico y Social, sobre la base de sus recientes logros, de manera que pueda desempeñar el papel que se le asigna en la Carta.
- Fortalecer la Corte Internacional de Justicia a fin de que prevalezcan la justicia y el imperio del derecho en los asuntos internacionales.
- Fomentar la coordinación y las consultas periódicas entre los órganos principales de las Naciones Unidas en el desempeño de sus funciones.

- Velar por que la Organización cuente, de forma oportuna y previsible, con los recursos que necesita para cumplir sus mandatos.
 - Instar a la Secretaría a que, de conformidad con normas y procedimientos claros acordados por la Asamblea General, aproveche al máximo esos recursos en interés de todos los Estados Miembros, aplicando las mejores prácticas y tecnologías de gestión disponibles y prestando una atención especial a las tareas que reflejan las prioridades convenidas de los Estados Miembros.
 - Promover la adhesión a la Convención sobre la Seguridad del Personal de las Naciones Unidas y el Personal Asociado¹⁴.
 - Velar por que exista una mayor coherencia y una mejor cooperación en materia normativa entre las Naciones Unidas, sus organismos, las instituciones de Bretton Woods y la Organización Mundial del Comercio, así como otros órganos multilaterales, con miras a lograr criterios perfectamente coordinados en lo relativo a los problemas de la paz y el desarrollo.
 - Seguir fortaleciendo la cooperación entre las Naciones Unidas y los parlamentos nacionales por intermedio de su organización mundial, la Unión Interparlamentaria, en diversos ámbitos, a saber: la paz y seguridad, el desarrollo económico y social, el derecho internacional y los derechos humanos, la democracia y las cuestiones de género.
 - Ofrecer al sector privado, las organizaciones no gubernamentales y la sociedad civil en general más oportunidades de contribuir al logro de las metas y los programas de la Organización.
31. Pedimos a la Asamblea General que examine periódicamente los progresos alcanzados en la aplicación de lo dispuesto en la presente Declaración, y al Secretario General que publique informes periódicos para que sean examinados por la Asamblea y sirvan de base para la adopción de medidas ulteriores.
32. Reafirmamos solemnemente, en este momento histórico, que las Naciones Unidas son el hogar común e indispensable de toda la familia humana, mediante el cual trataremos de hacer realidad nuestras aspiraciones universales de paz, cooperación y desarrollo. Por consiguiente, declaramos nuestro apoyo ilimitado a estos objetivos comunes y nuestra decisión de alcanzarlos¹⁵.

¹⁴Resolución 49/59, anexo.

¹⁵8a. sesión plenaria, 8 de septiembre de 2000

A.2. La ciudad y la igualdad

Por Enrique Peñalosa¹

Durante los últimos 150 años, la discusión ideológica giraba en gran parte alrededor de la búsqueda de la igualdad a través de la intervención del Estado en la economía. Sin embargo, el colapso del comunismo y la identificación de la intervención económica estatal con ineficiencias de diversa índole hicieron obsoleto casi de repente ese enfoque. Hoy hay consenso en el planeta sobre la conveniencia de administrar la mayoría de los recursos de la sociedad a través de la propiedad privada y el capitalismo. El problema es que por definición el capitalismo genera desigualdad. El surgimiento de la civilización occidental está relacionado con la fuerza liberadora del concepto griego y sobre todo judeocristiano de igualdad. Y durante los últimos 300 años, la mayoría de las guerras de independencia, las revoluciones y las luchas políticas tenían por objeto una mayor igualdad. La democracia, el principal resultado de estas luchas, implica la igualdad de todos ante la ley. La lucha por la igualdad no es algo que se pueda o se deba abandonar de un día para otro. Creer que es posible interrumpir el proceso de profundización de la igualdad es creer que se puede detener la historia. Una consecuencia de esa igualdad es la prevalencia del interés general sobre el particular. Más que en el voto universal, la esencia de la democracia reside en el cumplimiento de ese principio.

La pregunta entonces es cómo construir igualdad en la era del postcomunismo. En un mundo capitalista cada vez más integrado, el esquema tradicional de hacerlo cobrando impuestos para construir equidad tiene un límite: un país no puede fijar sus tasas de tributación por encima de ciertos niveles internacionales, porque la inversión generadora de empleo y riqueza se va. Evidentemente es necesario avanzar hacia una nueva concepción de la igualdad deseable. Adoptar la economía de mercado, que requiere para su adecuado funcionamiento que los ciudadanos y las empresas busquen el enriquecimiento y a la vez condenar ética o conceptualmente que haya ciudadanos muy ricos, linda con la esquizofrenia. Para la nueva igualdad no es problema que alguien tenga una gran riqueza. Aquel que tenga US\$200 millones y gane US\$15 millones anuales es como un pastor mitológico, condenado a cuidar su rebaño por el resto de la eternidad. No puede consumir lo que gana porque es demasiado. En realidad, administra recursos para la sociedad. Adam Smith, que era un filósofo moral, enseñó que no es malo actuar de manera egoísta. Explicó que si se busca el propio beneficio se favorece la sociedad, porque cada cual trata de enriquecerse produciendo bienes mejores a menor costo. Este principio de la organización social alrededor de la búsqueda del enriquecimiento individual sin interferencias estatales pareciera haber surgido más triunfante que nunca

¹Malpensante, No. 45, marzo 16– abril 30 del 2003

con el colapso del comunismo. Sin embargo, no siempre es válido. Si todos los naufragos tratan de aferrarse al bote salvavidas más cercano, lo hunden. De la misma manera, si todos los ciudadanos deciden usar el automóvil particular a la hora pico, destruyen la calidad de la vida urbana, por lo menos la que propondré en este documento. En lo urbano no es posible que cada cual busque su provecho sin la intervención del Estado. Debe haber normas sobre la altura de los edificios, el ancho de las vías y aceras.

Hay otros aspectos en que los principios de Adam Smith aplicados a ultranza no producen resultados óptimos. En muchas ocasiones el consumo público puede producir más bienestar que el consumo privado. Quizás consumir menos ropa o automóviles nuevos y en cambio tener y mantener excelentes parques, bibliotecas, espacios públicos, puede generar más bienestar. Esta transferencia del consumo privado al consumo público es la que hace el gobierno a través de los impuestos y el gasto público.

El modelo de ciudad

Hasta ahora en casi todo el mundo en desarrollo hemos venido copiando implícitamente el modelo de ciudad vigente en los países avanzados, en particular en los Estados Unidos, que evolucionó más en función de la movilidad de los automotores que de la felicidad de los niños. Si nuestras ciudades no son iguales a las norteamericanas es más por falta de recursos que por una decisión consciente de construir otro modelo. Nuestro atraso relativo puede ser una ventaja porque estaremos en capacidad de evitar los errores cometidos por otros y construir un modelo de ciudad más adecuado a nuestra realidad y aspiraciones. Quienes han orientado el desarrollo urbano durante los últimos 90 años han sido sobre todo los grupos medios altos de las sociedades, que a corto plazo se benefician del modelo actual. De no tomarse decisiones drásticas que cambien el rumbo que llevamos, el desarrollo económico, en lugar de mejorar la calidad de vida y los sentimientos de logro, profundizará la inequidad, la exclusión y afectará negativamente nuestra autoestima. Ahora bien, la manera de organizar la vida urbana puede ser un instrumento poderoso en la construcción de una sociedad más igualitaria e integrada y en lograr que prevalezca el interés general. Es posible crear un modelo de ciudad distinto para el mundo en desarrollo del que ha imperado durante los últimos 90 años, más sostenible en lo ambiental y en lo social. Para nuestro modelo, más que la distribución del ingreso, lo que importa es la distribución de la calidad de vida. Más específicamente aún, la igualdad que importa es la que importa a los niños. Los adultos inventan muchos juegos para diferenciarse a través de sus bienes materiales: automóviles de lujo, joyas, yates. Lo que importa a los niños es el acceso a espacios verdes, bibliotecas, campos deportivos, cursos de violín, y todo aquello que pueda servir para el desarrollo de su potencial humano.

¿Cómo hacer la ciudad y organizar la vida urbana? Éste es uno de los grandes

debates ideológicos de nuestro tiempo. Por ser ideológico no tiene respuestas correctas o incorrectas. Sin embargo, las implicaciones de lo que escojamos pueden generar atraso o competitividad, pérdida de identidad o autoestima, violencia o convivencia. De nada sirve que el gobierno haga con eficiencia impecable lo que no debe hacerse. Si la estrategia es equivocada, las mejores tácticas son inútiles. Definir cuáles proyectos públicos son equivocados es difícil. A diferencia del sector privado en el que la rentabilidad es la medida de éxito, casi todos los proyectos públicos parecen buenos: escuelas, carreteras, plantas de tratamiento de aguas residuales y demás. Desafortunadamente no hay recursos suficientes para realizar todos los proyectos deseables. Cuando se escogen unos, se dejan de hacer otros.

Partiendo del principio de equidad, es equivocado hacer aquellos proyectos que favorecen principalmente a los sectores de ingresos más altos de la población, dejando desfinanciadas las soluciones de los sectores con necesidades mucho más apremiantes. Empezar un proyecto multimillonario de tratamiento de aguas residuales en una ciudad con severos problemas de pobreza, en la que todavía no hay cobertura adecuada de alcantarillado, en la que cientos de miles de niños deben caminar entre el barro para llegar a la escuela porque no hay pavimento y mucho menos aceras, evidencia prioridades cuestionables.

Cuando se gobierna una ciudad en desarrollo es necesario tener un pie en el presente y otro por lo menos 50 años adelante. No sólo tenemos que pensar en las mayorías presentes; también en las futuras.

Las ciudades del mundo en desarrollo son distintas porque tienen características como las siguientes:

- Problemas de pobreza extrema.
- Tasas más altas de crecimiento poblacional.
- Densidades más altas.
- Problemas de desigualdad y exclusión más agudos.
- Niveles bajos de motorización.
- Generalmente climas sin fríos extremos.
- Generalmente vínculos familiares y comunitarios más estrechos; comportamientos más gregarios.

Dado que nuestra realidad es diferente, el modelo de ciudad que necesitamos también es diferente del que predomina en las ciudades avanzadas. Además, en las propias sociedades más avanzadas económicamente consideran que el modelo urbano que han creado tiene problemas. Estos problemas se agudizan en nuestro caso por la desigualdad de nuestras sociedades. Precisamente una de las pocas ventajas del atraso es que podemos evitar los errores en que pudieron haber incurrido los que van más adelante.

Otro punto debe ser tenido en cuenta: no vamos a alcanzar el nivel de desarrollo económico de los países avanzados en un futuro previsible. Si una ciudad de un país en desarrollo tiene un ingreso per cápita de US\$3.000 y una en los Estados Unidos de US \$40.000, con un incremento igual del 2 %, el ingreso de la ciudad en desarrollo se incrementa en US\$60, mientras que el de la norteamericana lo hace en US\$800. De modo que si medimos el éxito de una sociedad en términos de su nivel de consumo estamos condenándonos a ser unos segundones por varios siglos hacia el futuro². No es ésta una perspectiva halagüeña, particularmente para nuestros jóvenes. ¿Cómo retener a los más capaces? Definirnos como perdedores sin esperanza daña nuestra autoestima y afecta nuestra capacidad creativa. Lo anterior implica que necesitamos otro modelo, otra manera de definir el éxito. Nuestra medida de éxito debe incluir la felicidad, que es un concepto difícil de precisar y más aún de medir, pero que como meta vale la pena. En términos de felicidad, claramente hay rendimientos decrecientes respecto a incrementos del ingreso. La felicidad tiene más relación con el desarrollo del potencial humano que con el nivel de consumo, y aunque desarrollar ese potencial exige recursos, hay algunos lujos de los países avanzados que nos podemos dar sin alcanzar su nivel de desarrollo económico. Por ejemplo, después de trabajar duro durante mucho tiempo para alcanzar un nivel muy alto de desarrollo, ciudadanos tan ricos como los alemanes consideran que entre los placeres que de verdad valen la pena está salir a un parque o pasear en bicicleta por la ciclorruta de la ribera de un río. Pues bien, para lograr eso no necesitamos tener un nivel de ingresos de US\$30.000 per cápita. Tenemos además la ventaja de poderlo hacer durante todo el año, sin la interrupción del invierno. Podemos tener acceso a campos deportivos para jugar o ver jugar. Los placeres de una vía peatonal también están a nuestro alcance. En una ciudad tropical ésta podría estar bordeada de inmensos árboles, con un hilo de agua por el medio en el que jueguen los niños. Con pocos recursos adicionales es posible establecer bibliotecas y realizar conciertos.

En este documento no voy a referirme a lo obvio con relación a la ciudad deseada: que todos los ciudadanos tengan una nutrición adecuada, vivienda digna, servicio de acueducto, electricidad o una situación financiera sana. Me referiré no a lo que se requiere para sobrevivir, sino para vivir, a temas más controversiales y menos atendidos por los expertos urbanos.

Para definir un modelo de ciudad necesitamos aclarar cómo queremos vivir. Porque una ciudad es simplemente un medio para una manera de vivir. No es posible diseñar un sistema de transporte sin saber qué tipo de ciudad quiero; pero para saber qué ciudad quiero necesito saber cómo quiero vivir. Por ejemplo, yo propongo que es deseable vivir en un entorno urbano donde encuentre

²Esto no significa que nuestro ingreso no crezca. Simplemente que no vamos a alcanzar el nivel de ingreso de los países ricos en un futuro previsible.

vecinos y desconocidos en espacios públicos alrededor de mi residencia, y no en un barrio de bellos jardines pero sin gente en el espacio público.

Los elementos de la ciudad que propongo, aparte de un entorno urbano con gente en la calle, son los siguientes:

- Circundada por un gran banco de terrenos de propiedad pública para parques y proyectos de vivienda popular.
- Con restricciones severas al uso del automóvil particular en las horas pico, de modo que todos los ciudadanos se movilicen en transporte público durante esos intervalos.
- Densa, con más de 100 habitantes por hectárea, aunque sin grandes alturas, con abundancia de parques, plazas y espacios públicos peatonales.
- Con espacios públicos peatonales a lo largo de los frentes de agua, ya sean mares, lagos, ríos o quebradas.
- Con grandes vías peatonales que la atraviesen en varias direcciones, como ejes de vida, estructurando así una red de vías peatonales y de bicicletas.
- Con aceras amplias y sin desniveles en todas las vías con automotores.
- Con ciclorrutas aisladas físicamente del tráfico automotor a lo largo de todas las vías arterias.

En las ciudades en desarrollo, que van a duplicar su área construida durante los próximos 40 años, es viable incorporar muchos de estos elementos en un plazo relativamente breve. Pero aun si toma 100 o 200 años, es fundamental aclarar desde ahora cuál es nuestra visión de ciudad y de vida urbana.

Voy a referirme a tres elementos del modelo, a tres desafíos urbanos particularmente críticos para la estructuración de la ciudad deseada: la tierra, el espacio público peatonal y el transporte.

La tierra

Prácticamente todas las ciudades del mundo en desarrollo tienen problemas de barrios subnormales surgidos ilegalmente, tugurios, llamados también favelas, bidonvilles, entre otras apelaciones. No se trata, pues, de un problema causado por la incompetencia o la inmoralidad de un gobernante. Es sistémico.

El sistema de mercado y propiedad privada no funciona en el caso de la tierra suburbana, particularmente en ciudades en plena expansión. A diferencia de lo que ocurre con el tomate, cuya oferta aumenta cuando suben los precios, al tiempo que este aumento lleva a que los precios bajen de nuevo, la oferta de tierra alrededor de la ciudad es fija. La tierra con acceso a acueducto, educación, transporte y empleo no aumenta. Unos pocos propietarios de predios alrededor de la ciudad se enriquecen por cuenta del trabajo de toda la comunidad. Lo grave no es eso, sino que el sistema especulativo de la propiedad se

convierte en un inmenso obstáculo para la solución de vivienda de los ciudadanos de menores ingresos, especialmente si se trata de vivienda digna, con calidad urbanística, amplios parques y espacios peatonales.

Cada vez que se dinamiza la demanda de vivienda popular, ya sea porque mejoran las condiciones de empleo o ingresos o porque se canalizan recursos cuantiosos a esquemas de subsidio a la demanda, esto repercute sobre los precios de la tierra. Es decir, cada vez que mejora la capacidad de compra de los pobres, sube el precio de la tierra y se aleja la posibilidad de hacer vivienda popular de calidad al alcance de los más necesitados. Aunque frecuentemente se argumenta que el precio de la tierra no es un costo significativo dentro del costo de la vivienda, los desarrollos ilegales son prueba de lo contrario. Una vez que la gente consigue la tierra, de una u otra manera encuentra la capacidad de hacer una casa.

América Latina tendría hoy una calidad de vida muy distinta y mejor si se hubiera adelantado una reforma urbana profunda hace 50 años. Aún es indispensable. Es posible constituir grandes bancos de tierras públicas alrededor de las ciudades, tanto para grandes parques como para programas de vivienda. En Suecia, desde 1904 se adquirieron todos los terrenos alrededor de las ciudades donde éstas se expandirían hacia el futuro. Hay que tomar medidas radicales, porque de la calidad del urbanismo que se haga hoy va a depender en gran medida la calidad de vida de millones de ciudadanos por cientos de años. Se pueden aprobar leyes que permitan pagar los terrenos a muy largo plazo, digamos, mediante pequeñas sobretasas al impuesto predial a lo largo de muchos años. Otros mecanismos permitirían que estas tierras generen recursos para su pago sin perder su finalidad social. Por ejemplo, se pueden desarrollar ciudadelas de gran calidad para estratos de mayores ingresos en los bordes del gran parque, conectadas por sistemas de transporte público a los centros urbanos. De este modo, la valorización de los terrenos de las ciudadelas puede llegar a cubrir el costo del gran bloque de tierra adquirida inicialmente a precios de terrenos para usos agropecuarios.

La parte de la tierra que no se destine al parque sino a un banco de tierras para vivienda se puede administrar de la siguiente manera: una entidad pública construye la infraestructura urbanística de alta calidad y entrega mediante licitación grandes bloques a constructores privados. Éstos deben construir y vender en un período limitado y a precios que no excedan un tope³. Tam-

³Éste es el esquema de Metrovivienda, que pusimos en funcionamiento en Bogotá. Lo interesante del esquema de Metrovivienda es que en lo esencial no es un subsidio. Simplemente evita los incrementos de precio de la tierra y garantiza calidad urbanística. Y tiene un efecto regulador en el mercado de terrenos y viviendas similares. Pero el objetivo es que mantenga su capital, vendiendo la tierra. La única porción que vende al precio más alto posible es la parte destinada al comercio, que se convierte en un activo atractivo por estar ubicada en

bién existe la posibilidad de estructurar esquemas similares para programas de autoconstrucción, ya sea desde el lote mismo o desde una solución mínima de albergue. Lo principal es evitar que sigan surgiendo urbanizaciones ilegales en lugares inadecuados, con toda clase de carencias, en especial urbanísticas, que son las más difíciles de arreglar hacia el futuro. Claro que mejorar las condiciones de los barrios pobres que ya existen debe ser la prioridad de una administración municipal. El objetivo, sin embargo, no es simplemente legalizar los barrios y aclarar y normalizar los títulos de propiedad. Tampoco es suficiente llegar con acueducto, alcantarillado y pavimentos. Se trata de construir autoestima, sentido de pertenencia y valores.

Los procesos de mejoramiento barrial deben articularse alrededor de infraestructura de gran calidad para la gente: vías peatonales, jardines infantiles, parques, transporte público. Las comunidades de los barrios marginales son peatonales. Si de lo que se trata es de hacerles una demostración de respeto y mejorar su diario vivir, obras peatonales de gran calidad pueden tener un efecto dignificante mucho más importante que las vías para automotores⁴. Los hitos arquitectónicos urbanos y su majestuosidad no deben reservarse a los aeropuertos, museos o edificios del gobierno. Pueden ubicarse en barrios populares en la forma de plazas, avenidas peatonales, colegios, bibliotecas, esculturas.

Cuando se intenta la desmarginalización teniendo como objeto implícito una ciudad de segunda clase, se fracasa. Por el contrario, puede aprovecharse el carácter de los barrios: su arquitectura vernácula, sus calles estrechas o la vista sobre la ciudad desde la elevación. La arborización o la pintura de las casas con colores vivos mediante esquemas participativos construyen identidad. Son especialmente valiosos los programas mediante los cuales las organizaciones comunitarias conciben y proponen pequeñas obras, que luego de revisión por arquitectos e ingenieros son contratadas con las mismas comunidades. Más que obras, lo que estos proyectos construyen es comunidad, autoestima, sentido de pertenencia, dignidad. Algo similar, pero ya no con obras físicas sino con actividades culturales y deportivas, también puede financiarse con las comunidades organizadas.

Espacio público peatonal

Durante 5.000 años de historia urbana y hasta hace muy poco, todas las vías en las ciudades eran peatonales. Las personas compartían el espacio con coches

medio de un proyecto de vivienda muy populoso.

⁴En Bogotá hicimos una gran alameda peatonal de más de 15 kilómetros de longitud, con iluminación, arborización, bancas, a través de algunos de los sectores más pobres de la ciudad en donde las vías para automotores no estaban pavimentadas. El mensaje de respeto por la gente, la comunidad y la vida comunitaria era evidente. Esta alameda integra colegios, un centro comunitario que incluso tiene una piscina cubierta, una gran biblioteca y el sistema de transporte masivo Transmilenio.

y caballos, sin mayor riesgo. Cualquier niño podía caminar varias cuadras para hacer una diligencia o visitar un tío. Una carta escrita por Freud en Roma en 1907 es ilustrativa. Dice: “Por el medio de la plaza pasa la Avenida Umberto (en realidad la plaza es una ampliación de esa avenida) con sus carruajes y un tranvía eléctrico; pero no hacen ningún daño porque el romano nunca se quita del camino de un vehículo y los cocheros no parecen conscientes de su derecho de atropellar a la gente”⁵.

Las ciudades se hicieron para la gente. De repente, hace muy poco en términos de la historia, casi nada, aparecieron los automotores y convirtieron ese entorno humano por excelencia en un sitio extremadamente peligroso. Durante los últimos 80 años se han construido ciudades más para la movilidad de los carros que para la felicidad de los niños. Cuando aparecieron los carros debimos haber construido una red vial paralela exclusivamente para ellos. Pero las demandas derivadas de su uso, durante décadas exclusivo de los grupos de mayores ingresos, fueron avasalladoras. Y comenzamos a hacer una ciudad para los carros, lo que equivale a hacer una ciudad poco amable para el ser humano y francamente excluyente para los ciudadanos más pobres y los más vulnerables como los niños, los viejos y los discapacitados.

Los españoles construyeron nuestras ciudades coloniales alrededor de una plaza. Éste era el sitio de encuentro por excelencia de todos los miembros de la sociedad, sin importar su rango. Se dice que en nuestras plazas los jóvenes caminaban en una dirección y las jóvenes en la otra. Era el sitio de la interrelación humana. Inicialmente la plaza servía a una ciudad de cuatro o cinco manzanas. Era una relación armónica: una plaza o parque por cada cuatro manzanas. Esta proporción no se mantuvo. Las construcciones privadas se multiplicaron y los espacios públicos de encuentro se hicieron cada vez más escasos. Teniendo en cuenta que los estudiosos encuentran que la gente camina apenas tres cuadras para ir a un parque de barrio, en nuestras ciudades no debería crecer un niño a más de tres cuadras de un parque.

Con frecuencia se habla de ciudades “inhumanas” o “agresivas”. Cuando una ciudad produce estas sensaciones generalmente es porque no tiene espacios peatonales suficientes o porque los que tiene no son de una calidad adecuada. Lo que le da calidad a una ciudad es antes que nada su espacio público peatonal. El ser humano responde del modo en que es tratado. Si es tratado con agresividad, responde de esa manera; si es tratado de manera respetuosa y amable, actuará en consecuencia.

A primera vista parece que el tema del espacio público peatonal fuera irrelevante y hasta frívolo en ciudades con graves problemas de pobreza como las

⁵En Sigmund Freud, *The Letters of Sigmund Freud*, ed. E. L. Freud, Basic Books, Nueva York, 1975, pp. 261-263. Citado en Ash Amin y Nigel Thrift, *Cities: Reimagining the Urban*, Polity Press, Cambridge, uk, 2002, p. 21.

nuestras. Sin embargo, allí es donde más se necesita. Durante el tiempo libre es cuando más se sienten las diferencias de ingreso. En las horas de trabajo, tanto el directivo de una remuneración alta como el empleado de más bajo rango pueden tener niveles similares de satisfacción. En cambio, en el tiempo libre se presentan diferencias abismales. Mientras que la persona de ingresos altos va a restaurantes, tiene automóvil, sale al campo, va a casas de recreo, clubes, toma vacaciones en lugares distantes, el ciudadano de menores ingresos no tiene, aparte de la televisión, otra alternativa para él y su familia que el espacio público. ¿Qué hace un niño de un barrio popular en medio de una de las grandes ciudades del Tercer Mundo un domingo? Debemos comenzar a ver los parques y centros deportivos no como lujos, sino como necesidades esenciales, semejantes a los hospitales o a las escuelas. Otra virtud del espacio público peatonal en nuestras sociedades jerarquizadas es la de ser el único lugar donde todos nos encontramos como iguales. El espacio público peatonal de calidad comienza al menos a compensar nuestras enormes desigualdades. Salvedad hecha de los casos de extrema pobreza, una vía peatonal o un parque pueden proveer más satisfacción que incrementos significativos en los niveles de consumo individual. Y el costo es insignificante si se incorpora oportunamente en las áreas de expansión de las ciudades. Las autoridades de planeación deben elaborar los diseños urbanísticos de las zonas de expansión urbana y no simplemente aprobar lo que cada propietario de tierra les presente. Así podrían definir toda una red de vías peatonales y parques. Al menos es posible exigir que la expansión urbana se haga exclusivamente mediante grandes bloques, de cientos de hectáreas en las ciudades grandes, de modo que las zonas de cesión pública para parques no sean espacios pequeños de uso casi exclusivo de los vecinos inmediatos ⁶, sino grandes zonas verdes, preferiblemente conectadas a lo rural. Así entrarían como dedos verdes del campo a la ciudad integrando socialmente con senderos y ciclorrutas diversos sectores urbanos ⁷. Los parques son semejantes a un bien de consumo, a un servicio que recibimos pero que no se agota. Con un mínimo de mantenimiento, la inversión en espacio público de calidad es extraordinariamente rentable en términos de bienestar, porque no cesa de producir dicha generación tras generación. Los ciudadanos de nuestros países podrán tener bienes de consumo parecidos a los que disfrutan hoy quienes viven en los países desarrollados en un plazo más o menos largo. Lo que es invaluable y que difícilmente podrán conseguir en el futuro si no se incorporan desde ahora a la trama urbana son las zonas verdes, las plazas y los espacios

⁶En algunas ciudades los particulares encierran ilegalmente los parques públicos adyacentes a sus edificios o conjuntos residenciales. Durante mi período como alcalde en Bogotá hicimos un gran esfuerzo por recuperar para la ciudad muchos de estos espacios, pero desafortunadamente la práctica fue casi abandonada con posterioridad.

⁷En algunos países europeos, por ejemplo en Dinamarca y Holanda, hay excelentes ejemplos de estos dedos verdes.

peatonales de calidad.

Los seres humanos necesitamos caminar y estar con gente. Podríamos sobrevivir encerrados toda la vida en un apartamento, pero para ser felices necesitamos caminar. Aunque un ave puede sobrevivir encerrada en una pequeña jaula, sospechamos que estaría más feliz en una jaula del tamaño de un auditorio y más feliz aún volando libre. Del mismo modo, nosotros estamos mejor en aceras de diez metros de ancho que en aceras de tres metros, y mejor aún en una vía peatonal sin la amenaza de ser atropellados.

Los automóviles estacionados sobre las aceras o en bahías de estacionamiento donde debería haber aceras evidencian irrespeto por la dignidad humana, en especial por la de los más vulnerables, los viejos, los niños, los discapacitados y también los pobres, que caminan mucho más que los ciudadanos de ingresos más altos. De ahí que la presencia de los automóviles sobre espacios que deben ser exclusivamente peatonales sea indicio de una democracia que no funciona bien. Es interesante que en alemán las palabras ciudadano (*bürger*) y acera (*bürgersteig*) estén estrechamente relacionadas. Si la ciudad es un gran lugar de encuentro ciudadano, esto acontece antes que nada en su espacio público peatonal: los demás son espacios privados o vehiculares.

Algunos comerciantes que hacen o que desean hacer bahías de estacionamiento en los andenes argumentan que éstos son suficientemente amplios para estacionar vehículos y para que pase la gente. Lo que ocurre es que los andenes no son simplemente para pasar, para ir de un lado a otro; son para disfrutar de la ciudad, para conversar, jugar, besar. Quedan junto a las calles pero no son parientes de éstas. Lo son más bien de las plazas y de los parques. De modo que decir que en el andén hay suficiente espacio para estacionar vehículos y además para que pase la gente equivale a decir que el parque o la plaza principal de una ciudad se puede convertir en un gran estacionamiento, siempre y cuando se deje suficiente espacio entre los vehículos estacionados para que pase la gente.

El espacio público peatonal debe ser defendido de la invasión de los comerciantes informales. La proliferación de vendedores informales en espacios públicos, que llegan incluso a construir casetas permanentes allí, no es un problema de pobreza como se argumenta con frecuencia. Una actividad ilegal como la venta de mercancías en una buena ubicación en el espacio público siempre será más rentable que un empleo equivalente en el sector formal. La ocupación masiva de sitios estratégicos por parte de vendedores ocasiona desorden y atrae criminalidad. Los sectores ocupados se deterioran, los negocios formales se quiebran, las edificaciones se subutilizan o se abandonan. Esta situación ahuyenta a los turistas, a los profesionales calificados que tienen la opción de dejar la ciudad o el país, a los inversionistas y, por todas estas razones, causa desempleo y pobreza. Si el espacio público de alta calidad construye integración social, su

deterioro profundiza la exclusión. Los ciudadanos de ingresos altos encuentran alternativas privadas al espacio público, como centros comerciales, conjuntos cerrados, clubes, mientras que a los más pobres no les queda otra opción que sufrir el deterioro de su calidad de vida. Poco a poco se conforman patrones y espacios excluyentes en los que se desarrolla la vida urbana de manera cada vez más segregada. En términos urbanísticos, lo que le da carácter y hace memorable a una ciudad es su espacio público peatonal. Nadie regresa de París elogiando las autopistas francesas. Nueva York, París o Londres reciben más de 10.000 millones de dólares anuales cada una por turismo porque son lugares agradables para caminar y ver gente. Habrá quienes digan que el atractivo de esas ciudades son sus formidables museos. Sin embargo, la inmensa mayoría de los visitantes del Museo Metropolitano de Nueva York o de la National Gallery de Londres no diferenciarían entre estos museos y otros que pueden encontrar en ciudades norteamericanas como Atlanta o Houston. La gente en las calles y espacios públicos, el atractivo de los edificios y parques y en general el entorno urbano para los peatones son lo que hace la diferencia. Se ha estimado que en Disney los visitantes pasan menos del 3% del tiempo en los juegos y espectáculos⁸; el resto lo disfrutan en una ciudad peatonal donde ven a mucha gente. No hay una foto de publicidad de un sitio turístico donde aparezca un automóvil.

Los centros comerciales son ambientes peatonales donde un niño no corre peligro al soltar la mano de su madre. Sus visitantes recorren vías peatonales internas, donde no hay carros estacionados y hay seguridad. Pero son espacios privados pues el que no tiene capacidad de compra se siente excluido. Los comerciantes, por supuesto, no están particularmente interesados en instalar bancas para que la gente se siente a conversar. El espacio público debería ofrecer lo que ofrecen los centros comerciales, pero al aire libre, con árboles, cielo y aves, con una integración social más amplia y con más bancas. Pero si el espacio público no es una opción, es sustituido por esquemas privados menos incluyentes: el comercio de calle o vía peatonal cede el lugar al centro comercial, el parque o campo deportivo público al club.

Generalmente se exigen estudios de impacto ambiental para la construcción de infraestructura, con el fin de evitar o minimizar los efectos negativos sobre la flora y la fauna. Del mismo modo se deberían exigir estudios de impacto humano que establezcan la manera de aprovechar las obras de infraestructura para el disfrute humano y principalmente de los niños. Esto implica principalmente algunas inversiones complementarias en espacio peatonal. Todas las vías urbanas deben tener aceras, ojalá con un ancho de por lo menos la mitad de la cesión vial; todas las carreteras deben tener ciclorrutas paralelas, especialmen-

⁸ Andres Duany, *Suburban Nation*, North Point Press, Nueva York, 2000, p. 63.

te en zonas cercanas a los cascos urbanos; los embalses de las hidroeléctricas deben tener accesos peatonales y muelles para facilitar su uso recreativo; los grandes tanques de agua deben acomodar canchas deportivas en su superficie; los canales de drenaje que atraviesan las ciudades deben tener espacios peatonales en sus costados, que funcionen como senderos y ciclorrutas a través de la ciudad, con la ventaja de no tener vías para automotores adyacentes.

Todas las ciudades tienen mares, lagos, ríos, quebradas o al menos canales de drenaje para las aguas lluvias. Estos espacios son particularmente propicios para establecer parques lineales que integren amplios sectores de la ciudad. En Bogotá estamos terminando el parque lineal Juan Amarillo-Molinos que, con varios ramales, atraviesa la ciudad de oriente a occidente. Este parque de más de 40 kilómetros de longitud descontamina quebradas, recupera humedales y sirve además de ciclorruta, con la ventaja de ir casi siempre entre espacios verdes aislados del tráfico. Están listos los diseños para otros dos parques lineales similares, a lo largo de los ríos San Cristóbal-Fucha y Tunjuelo. Lo más atractivo de estos parques es que integran amplios sectores de todos los estratos socioeconómicos. Algunos espacios de encuentro peatonal no exigen ninguna inversión. Cada domingo en Bogotá se cierran 120 kilómetros de vías arterias al tráfico vehicular durante siete horas, y más de un millón y medio de personas de todas las edades y condiciones salen a disfrutar de la ciudad. El delito está prácticamente ausente de este entorno por la integración y solidaridad que allí se vive. Si algún domingo o festivo la policía se demora en cerrar algún tramo de la “ciclovía” al tráfico vehicular, la gente lo hace por su cuenta colocando piedras o cualquier obstáculo que encuentre a la mano. También se ha convertido en una tradición bogotana la ciclovía nocturna de Navidad, en la que una noche cercana a la Navidad se cierran las mismas vías de los domingos y casi tres millones de ciudadanos se apropian de su ciudad y de la noche para apreciar la iluminación navideña, pero sobre todo para estar juntos.

Teniendo en cuenta el creciente problema de criminalidad en las ciudades en desarrollo, es de interés señalar la correlación existente entre el espacio público y la seguridad. En espacios públicos ordenados y amables, la criminalidad se reduce sensiblemente. Hay varias explicaciones para esto. El ex alcalde de Nueva York, Rudy Giuliani, se refería con frecuencia a la teoría de unos académicos de Harvard denominada “la teoría de la ventana rota”. Según ella, si alguien rompe una ventana en un edificio y el daño no se repara rápidamente, pronto romperán otras; luego comenzarán a arrojar basura; en seguida personas dedicadas a actividades no lícitas se ubicarán allí y el lugar terminará volviéndose de alta criminalidad. En ambientes desordenados, los buenos se sienten minoría y no actúan solidariamente. Por el contrario, un lugar bien tenido da la impresión de una comunidad alerta, en la que los buenos ciudadanos actúan de manera solidaria. Y como la comunidad se conoce y se integra en los parques,

campos deportivos y espacios públicos, por eso mismo esta comunidad es más segura⁹.

Sin duda, la mayoría de las ciudades del mundo en desarrollo no tienen un hito arquitectónico como la catedral de Notre Dame, pero podrían tener monumentos al encuentro de los seres humanos. Las ciudades tropicales podrían estar atravesadas por amplias avenidas peatonales bordeadas de inmensos árboles tropicales; por el centro podría correr un hilo de agua con piletas a intervalos para el juego de los niños y para que los pájaros beban. Estos espacios, además de construir calidad de vida, serían hitos urbanos que fortalecerían la identidad y la autoestima.

Transporte

El transporte urbano es un desafío muy peculiar porque, a diferencia de los demás, en lugar de mejorar con el desarrollo económico tiende a empeorar. La cultura, la salud y la educación mejoran con el desarrollo económico. En cambio, con el modelo vigente, el crecimiento económico trae aumentos en el número de vehículos en las calles, que llevan a embotellamientos progresivamente peores. Más grave aún, tratar de aliviar el problema de los embotellamientos construyendo más infraestructura, que es lo que tradicionalmente se hace, empeora la desigualdad y deforma la estructura urbana. Dicho de otro modo, construir más infraestructura vial para arreglar el problema de los embotellamientos equivale a arreglar el problema de la gordura aflojándose el cinturón. Es como tratar de apagar un fuego con gasolina: el problema no sólo no mejora, sino que empeora. El hecho de que el problema empeore con el progreso económico pone en evidencia que no se trata de un sistema sostenible. Por eso, en lugar de profundizar el modelo, debemos cambiarlo. El atraso económico tiene ventajas; como hace que la mayoría de nuestra población se movilice en transporte público y como implica que nuestras ciudades sean relativamente densas, nos permite evitar algunos errores cometidos por las ciudades de los países más avanzados.

Algunas verdades son contraintuitivas: Copérnico casi fue sentenciado a muerte por decir que la Tierra giraba alrededor del sol, cuando para todos no cabía duda de lo contrario. Que los intereses altos lleven a que baje la inflación parece contraevidente para el lego en economía, que percibe los intereses como un costo de producción cuyo aumento necesariamente lleva a un incremento en los precios. Del mismo modo, parece obvio que ampliar la infraestructura vial alivia los embotellamientos. Ocurre lo contrario.

Cada obra nueva de infraestructura vial, un intercambiador, una ampliación de una vía, un paso a desnivel o una autopista nueva, genera su propio tráfico,

⁹El espacio público de calidad también es la mejor garantía contra el deterioro y la desvalorización de un sector. Los sectores que mantienen espacios públicos de calidad tienden a valorizarse o por lo menos a mantener su valor.

hasta que el embotellamiento se hace igual que antes. Apenas se construye una vía nueva, digamos una autopista del centro hasta el borde de la ciudad, la rapidez con que ésta permite acceder al centro estimula el desarrollo de nuevos proyectos de vivienda, industriales y comerciales, tanto en sus costados como hacia su extremo. Y los nuevos desarrollos generan tráfico. Debe recordarse que para efectos del tráfico es lo mismo duplicar el número de vehículos que duplicar el número de kilómetros que recorre el mismo número de vehículos.

Adicionalmente, se ha encontrado que un porcentaje de los viajes son inducidos por la misma infraestructura vial. Por ejemplo, si está la vía, se hacen viajes a establecimientos comerciales más lejanos, que de otra manera no se harían. Unos pocos años después la nueva vía también estará completamente embotellada. Pero algo ha ocurrido: la ciudad se ha extendido y su densidad es menor.

Esta consecuencia de la construcción de infraestructura vial está demostrada. Sin embargo, se continúa tratando de aliviar los embotellamientos con nuevas vías, porque quienes tienen y conducen automotores presionan para que esto se haga. Debemos observar lo que ocurre en los Estados Unidos. A una ciudad del Tercer Mundo le tomaría más de 100 años tener una infraestructura vial como la de Atlanta, Houston o Los Ángeles. Sin embargo, en estas ciudades, como en las demás ciudades norteamericanas estructuradas alrededor de grandes autopistas, el tiempo perdido en embotellamientos aumenta todos los años. El automóvil es un medio estupendo de movilidad individual, pero no funciona si todos lo tratamos de utilizar simultáneamente en las horas pico.

La característica de las ciudades de los países avanzados que es más importante evitar es el desarrollo suburbano de baja densidad que caracteriza principalmente a las ciudades de Estados Unidos. Algunos inconvenientes de los suburbios de baja densidad son:

1. Es imposible prestar un servicio de transporte público de bajo costo y alta frecuencia. En una ciudad extensa, las distancias promedio de los viajes son grandes y no es posible tener costos bajos. La baja concentración de población alrededor de cualquier parada del bus o del tren hace que no se pueda ofrecer un servicio de alta frecuencia, porque los vehículos irían casi desocupados. En contraste, la ciudad densa no sólo permite tener transporte masivo de bajo costo y alta frecuencia, también viabiliza un uso amplio del taxi, que para las distancias relativamente cortas de la ciudad densa no es excesivamente costoso. Socialmente, el taxi como vehículo complementario de sistemas masivos tiene ventajas sobre el automóvil privado porque no requiere estacionamientos y porque estimula que muchos viajes cortos se hagan a pie.
2. La ausencia de transporte público de bajo costo y alta frecuencia, y en

muchos lugares la ausencia total de transporte público, deja varados a los niños, los jóvenes sin automóvil, los viejos, los ciudadanos de menores ingresos que no pueden conducir. Es un ambiente excluyente.

3. De tener la densidad típica de una ciudad de Estados Unidos, una ciudad latinoamericana promedio ocuparía un área diez veces superior. Éste no es un uso eficiente de la tierra, que podría tener destinos agropecuarios, recreativos y de conservación ambiental. El ciudadano en medio de una ciudad queda muy alejado del campo.
4. La ciudad de baja densidad no es un ambiente amigable para el peatón, porque las distancias a puntos de interés, como el comercio, son muy largas. Con frecuencia, muchos suburbios en los Estados Unidos no tienen siquiera aceras, por lo que los peatones se sienten inseguros frente a los automóviles, especialmente cuando hay niños.
5. Si hay pocos habitantes por hectárea y si los ambientes no son amigables para los peatones, hay poca gente en las calles de los suburbios. Son solitarios. Sus habitantes van a los centros comerciales para poder encontrar gente.
6. El residente de los suburbios va menos a teatros, restaurantes o museos en el centro, lo que hace que las ciudades con baja densidad tengan menos actividad cultural.

La única solución al desafío de la movilidad en la ciudad es el transporte masivo, pero no para que lo usen los ciudadanos de menores ingresos sino toda la sociedad. El problema del transporte no es técnico, sino político. Antes de pensar en políticas de transporte, es necesario decidir cuál de los siguientes es el objetivo: a) Lograr la movilidad digna de toda la población al menor costo posible; b) Aliviar los embotellamientos que afectan a los sectores de la población de ingresos más altos. Aunque la respuesta es aparentemente obvia, la realidad es que la mayoría de los gobiernos de las ciudades en desarrollo actúan guiados por el segundo objetivo.

Es ilustrativo imaginar lo que pasaría si 300 personas en una ciudad deciden utilizar el helicóptero para su movilización diaria. Lo primero es que desearíamos que una de ellas no fuera nuestro vecino. El estruendo del aparato al decolar para ir a la oficina, al mercado o al cine sería tremendo¹⁰. Además, lo que funciona bien para unos pocos no necesariamente funciona para toda la población. Es posible que 300 personas se movilen en helicóptero, pero sería imposible que toda la población urbana se movilizara de la misma

¹⁰Hacia finales de la década de los noventa, los vecinos de alguien que comenzó a utilizar un helicóptero para volar del jardín de su casa en el norte de Nueva York hasta Manhattan entablaron un pleito. El juez sentenció que este ciudadano no podía utilizar su jardín como helipuerto porque perturbaba la paz del vecindario.

manera, porque se estrellarían unos contra otros. El caso del automóvil es similar al del helicóptero. Es perfectamente posible que una minoría, digamos el 25 % de la población, se movilice en automóvil, pero si suponemos una ciudad relativamente compacta y con gente en los espacios públicos, esta ciudad colapsa si toda la población utiliza el automóvil al mismo tiempo. Además, el automóvil también hace ruido y contamina el aire, especialmente cuando se utilizan grandes cantidades de manera simultánea; y genera costos más altos que el helicóptero, por cuanto utiliza una infraestructura vial muy dispendiosa por los metros cuadrados valiosos que ocupa y por el costo de construirla y mantenerla; representa una amenaza para los peatones; de hecho, decenas de miles de peatones mueren atropellados por automotores en el mundo cada año; congestiona las vías, haciendo que los buses se muevan con lentitud y que sus pasajeros pierdan miles de horas al año.

En síntesis, construir infraestructura vial para aliviar los embotellamientos es altamente regresivo, pues destina recursos públicos escasos a favorecer prioritariamente a los ciudadanos de mayores ingresos. Son recursos que se quitan a necesidades más urgentes e importantes de los menos favorecidos. Además, las autopistas nuevas generan otros costos a los más necesitados, pues por lo general se hacen demoliendo barrios populares, que es donde resulta más económico hacerlo. Una autopista a través de un barrio lo desvaloriza por el ruido, por la dificultad para atravesarla a pie, por la contaminación. Las autopistas elevadas multiplican los efectos negativos. Sin embargo, en muchas ciudades tercermundistas las exhiben con orgullo como símbolo de modernidad. En realidad son monumentos a la desigualdad.

Debemos recordar que en las ciudades del mundo en desarrollo sólo una minoría de la población se moviliza en automóvil. Si verdaderamente deseamos que prevalezca el interés general, en lugar de tratar de construir más infraestructura vial debemos prohibir el uso del automóvil durante las horas pico, por ejemplo unas 2,5 horas en la mañana y otro tanto en la tarde¹¹. De implementarse esta

¹¹En Bogotá emprendimos la aventura colectiva de tener un día sin carro. Lo hicimos en un jueves laboral. La ciudad de casi siete millones de habitantes funcionó sin el carro. El objetivo era reflexionar sobre las ventajas de no tener automóviles y demostrarnos que era posible funcionar sin ellos. La acogida ciudadana fue tan grande que realizamos una consulta popular, un referendo, en el que los ciudadanos establecieron como día sin carro un jueves de febrero cada año. También preguntamos algo más radical: si querían prohibir el uso del carro durante tres horas pico en las mañanas y otras tres en la tarde, todos los días a partir del 2015. Tan claro tenían algunos grupos de comerciantes que se oponían a la medida que irían a perder, que adelantaron una campaña no para que los ciudadanos votaran negativamente, sino para que no votaran. Porque así esperaban que no se alcanzara el porcentaje del 33 % de los votantes potenciales necesario por ley para que el referendo tenga validez. Aunque hay dudas jurídicas sobre si finalmente se alcanzó ese porcentaje y aunque por ahora no está vigente el mandato, la mayoría apoyó la propuesta. Anteriormente habíamos establecido el llamado Pico & Placa, que saca de circulación el 40 % de los automóviles todos los días

medida, se obtendrían los siguientes beneficios:

- La mayoría de la población que utiliza el bus ahorraría tiempo de transporte que podría dedicar a su familia.
- Habría menos contaminación del aire y menos ruido.
- Habría mayor disponibilidad de recursos públicos para atender las necesidades de los más pobres.
- Se evitaría una estructura urbana de baja densidad, dependiente del automóvil, que es excluyente y, por ese y otros motivos, indeseable.
- Peatones y ciclistas tendrían al menos cinco horas al día para moverse con menos contaminación y menos riesgo de ser arrollados por un vehículo automotor.

La decisión de restringir el uso del automóvil favorece de manera contundente en el corto plazo a la mayoría de la población que no se moviliza en automóvil, pero pensando un poco más allá favorece a toda la población. Las restricciones al uso del automóvil particular pueden asumir formas distintas a su prohibición durante las horas pico: restricciones de uso por número de placa; peajes; combustibles muy costosos¹²; cobro por el uso vial de acuerdo con la importancia de la vía y la hora a la que es utilizada, mediante rastreo satelital de cada vehículo. También está la restricción más sencilla de todas: los embotellamientos.

Hablar de transporte es hablar de estructura urbana. El tipo de transporte no sólo depende de la densidad, sino que la genera. Las restricciones al uso del automóvil particular son la única manera de estimular la densificación y evitar la suburbanización. En la medida en que los automóviles se movilizan velozmente y sin restricciones, el desarrollo de la ciudad se alejará cada vez más del centro. De ahí que los embotellamientos no deban verse como un problema, sino como un instrumento muy útil para lograr el propósito que se busca. Las otras formas de restricción del uso del automóvil también podrían lograr ese propósito, pero pueden presentar problemas de equidad o dificultades políticas para su implementación. Cuando, debido al desarrollo económico, la población de menores ingresos comienza a alcanzar niveles que le permiten adquirir un automóvil, los expertos comienzan a inventar esquemas de cobros cada vez más elevados por el uso del automóvil, por ejemplo, por el uso de las vías, de manera que los grupos de mayores ingresos mantengan la exclusividad en el uso de la costosísima infraestructura vial, sin embotellamientos. Si se encuentra que el

durante cuatro horas pico. Cada automóvil tiene dos días semanales de restricción.

¹²Para que incidan en el comportamiento de los conductores, los combustibles deberían ser extremadamente costosos. Se ha encontrado que el uso del automóvil generalmente es inelástico a los incrementos en el precio de los combustibles.

uso del automóvil particular genera costos sociales altos y la ausencia total de éste al menos durante unas horas trae beneficios importantes, cualquier pago que se haga por usarlo difícilmente compensaría el costo social que ocasiona. Al fin y al cabo, no se permite que alguien pague para fumar en lugares donde esto es prohibido o que mediante un pago alguien pueda hacer disparos al aire. Así como las restricciones al uso del automóvil, tales como los embotellamientos, son prácticamente necesarias para alcanzar densidades altas, también lo son para que los ciudadanos cambien el transporte privado por el público. En casi todas las ciudades del mundo el porcentaje de los ciudadanos que se movilizan en transporte público ha venido disminuyendo durante las últimas décadas¹³. Aquellas ciudades de países en desarrollo que han tenido las tasas de crecimiento económico más altas han sido las que más rápido han visto disminuir el uso de transporte público y aumentar el uso del automóvil privado. En Santiago, en 1977 el 12,3 % de los viajes se hacían en automóvil particular; en 1991 se pasó al 23,4 %, y en 2001 al 36,7 %. La reducción de la participación del transporte público tiene poca relación con la calidad del transporte público o con la calidad urbana, a diferencia de lo que podría suponerse. Por ejemplo, en París, una de las ciudades del mundo con más atributos y con uno de los mejores sistemas de transporte público, durante dos décadas (1980-2000) el número de pasajeros del transporte público permaneció constante, no obstante la entrada en operación de una nueva línea de metro de gran calidad, mientras el número de usuarios del automóvil crecía alrededor de 3 % anualmente, lo que implicó que la distancia promedio de la casa al trabajo aumentó significativamente.

Hay ciudades en países avanzados, como el área de Manhattan en Nueva York, en las que la población no tiene automóvil. Cuando alguien requiere uno, lo alquila, digamos, para salir de paseo un fin de semana. El ahorro que se obtiene al no tener automóvil es cuantioso. Se estima que el costo anual de un automóvil promedio, incluyendo depreciación, combustible, seguros y mantenimiento, es superior a los US\$8.000, una suma que pesa en el ingreso de la mayoría de los ciudadanos. Adicionalmente, el costo del estacionamiento es grande. En una ciudad densa el costo del espacio para guardar dos automóviles puede representar más del 20 % del costo de la vivienda. Pero en las ciudades que se movilizan prioritariamente en automóvil, el número de estacionamientos por cada vehículo es mucho mayor que el de casas. Se estima que hay cerca de quince puestos de estacionamiento por cada automóvil en la ciudad típica de Estados Unidos. Los estacionamientos se diseñan para el momento pico de

¹³Las pocas excepciones a esta regla son ciudades en las que el porcentaje de la población que se movilizaba en transporte público hace 40 años era muy bajo. Es el caso de Washington, por ejemplo. Cuando se construyó el metro, aumentó la participación del transporte público en el total de viajes, pero aun así sigue siendo muy bajo.

uso, lo que tiene sentido, por ejemplo, para un almacén, que desea acomodar a todos sus clientes en los días previos a Navidad. El ahorro público en una ciudad que se moviliza en transporte público es enorme. La ciudad del automóvil puede ser veinte veces más extensa que la ciudad densa y peatonal, la cual tendrá por lo tanto una red vial mucho menos extensa. El ahorro en construcción y mantenimiento vial de la ciudad densa que se moviliza en transporte público se puede destinar a educación, parques, centros deportivos, música y otras actividades culturales.

Las ciudades de los países en desarrollo no podrán contar nunca con un sistema de transporte férreo que permita la movilización de la mayoría de la población. Los sistemas férreos son muy costosos de construir y de operar, especialmente si son subterráneos. En América Latina ningún sistema de transporte urbano férreo llega a atender ni siquiera el 10 % de los viajes. Claro que si una sociedad cuenta con recursos públicos abundantes y la inversión en sistemas férreos no tiene costos de oportunidad altos, estos sistemas pueden ser una opción. Pero los sistemas subterráneos no son agradables, salvo en tramos muy cortos. Es preferible tener iluminación natural, viajar viendo edificios, árboles, gente. En general, hay que tener cuidado con las decisiones de adquisición de sistemas férreos de transporte urbano, por las siguientes razones: a) Los ciudadanos de ingresos altos pueden preferirlos simplemente para evitar cualquier reducción del espacio vial que usan sus automóviles. Así, los más pobres irán enterrados, para que los buses no estorben. b) Los sistemas férreos dan una imagen de modernidad y de Primer Mundo. El problema es que los recursos que absorben se quitan a soluciones potenciales de problemas graves y urgentes de los ciudadanos más pobres. c) Los vendedores de sistemas férreos con frecuencia utilizan sobornos y mecanismos similares en sus esfuerzos de ventas.

Los sistemas estructurados con base en buses, especialmente si, como es deseable, los buses son de propiedad de operadores privados, no presentan las posibilidades de corrupción de los sistemas férreos. Pero sus ventajas van mucho más allá. El sistema de transporte masivo de calidad más económico que se conoce es aquel con base en buses de alta capacidad y carriles exclusivos creado en Curitiba por Jaime Lerner a comienzos de la década de 1970. Posteriormente ha sido utilizado en otras ciudades, incorporándole nuevas tecnologías desarrolladas recientemente, como son las tarjetas inteligentes¹⁴. Sacando todos los vehículos de algunos carriles, las vías de cualquier ciudad pueden servir para el funcionamiento de sistemas de transporte masivo con base en buses arti-

¹⁴Es el caso del sistema Transmilenio de Bogotá, cuya concepción y diseño iniciamos en 1998 y pusimos en operación a finales del año 2000. Transmilenio es interesante, además, porque Bogotá es una ciudad con un ingreso per cápita muy inferior al de Curitiba, con una población muy superior y una densidad mayor. Actualmente es el sistema de transporte masivo, basado en buses, que más pasajeros moviliza por kilómetro en el mundo.

culados, con capacidades y velocidades similares a las de un metro, pero con costos de inversión y operación que son sólo una fracción de los de los sistemas férreos. Mientras el más económico de los sistemas férreos exige una inversión mínima de US\$50 millones por kilómetro, y si es subterráneo rara vez menos de US\$100 millones, el sistema con base en buses puede requerir una inversión pública de apenas US\$3 millones por kilómetro¹⁵. A diferencia de los sistemas férreos que casi nunca cubren sus costos de operación, los sistemas basados en buses, como el Transmilenio de Bogotá, son rentables con tarifas cercanas a los US\$0,40 por viaje.

Los ingredientes esenciales del sistema son: carriles exclusivos para la operación del sistema, preferiblemente en el centro de la vía, para que los buses no se vean obstaculizados por vehículos que entran y salen de estacionamientos; buses de empresas grandes y no de propietarios individuales, en un sistema en que el ingreso del conductor y de la empresa propietaria no dependa del número de pasajeros que recoja por viaje; los pasajeros pagan cuando entran a la estación, de modo que cuando llega un bus pueden descender de éste, digamos, 100 pasajeros y subir otros 100 en segundos, ya que han pagado de antemano y no tienen que utilizar escalas para subir al bus pues el piso está al mismo nivel del de la estación; esto también permite el acceso a sillas de ruedas y coches de bebé con facilidad; uso de tiquetes inteligentes, que permitan el cambio de un bus a otro, ya sea de un bus local a uno expreso, o de una línea a otra. El sistema inventado por Lerner en Curitiba tiene tantas ventajas que parece una solución obvia. La pregunta es entonces ¿por qué pasaron dos décadas desde su implantación sin que se pusiera en funcionamiento en otras ciudades? Todavía hoy sobran dedos en una mano para contar los sistemas en operación en ciudades en desarrollo¹⁶. La respuesta es muy sencilla: el tema del transporte público no interesa a los sectores de ingresos más altos de la población, ni a los gobiernos de las ciudades, que se interesan mucho más en construir infraestructura prioritariamente para los automóviles de estos grupos¹⁷.

Algo similar ocurre con la bicicleta. En ciudades de economías avanzadas con

¹⁵Mi sugerencia es que la inversión sea superior, de unos US\$5 millones por kilómetro, para que se mejore radicalmente el espacio público peatonal a lo largo de la ruta y en las vías perpendiculares a las estaciones. Un espacio público de alta calidad aumenta el número de usuarios; es el alimentador más económico del sistema, y lleva a que la ciudadanía identifique el proyecto con el mejoramiento de la calidad urbana, no lo contrario, que también puede llegar a ocurrir si no se hacen esfuerzos en este sentido.

¹⁶Aunque propuse el sistema para Bogotá por muchos años previos a mi elección, cuando finalmente fui elegido e iniciamos los estudios, los diseños y el proyecto, temía que hubiera algún problema no previsto. Parecía demasiado bueno para ser verdad.

¹⁷Lo mismo ocurre con frecuencia en otros temas. Por ejemplo, como las clases medias altas y altas de las ciudades en desarrollo no utilizan el sistema de educación pública, tienden a no estar particularmente interesados en su calidad.

inviernos duros, como las holandesas o las danesas, más del 30 % de la población se moviliza en bicicleta. En cambio, en las ciudades del mundo en desarrollo, con climas más benignos, el porcentaje de la población que usa la bicicleta es casi siempre insignificante. En países de Europa del norte como Holanda, Dinamarca o Suecia, donde los hogares tienen ingresos suficientes para adquirir un automóvil, hay redes muy extensas de ciclorrutas físicamente protegidas del tráfico. Casi todas las calles tienen ciclorrutas y aun las carreteras rurales tienen ciclorrutas paralelas. ¿Cómo se explica que en las ciudades del mundo en desarrollo, en que el único medio de transporte individual accesible para la mayoría es la bicicleta, donde generalmente no hay inviernos con fríos extremos, donde los recursos estatales para construir infraestructura vial son escasos y tienen un gran costo de oportunidad en términos de soluciones a necesidades urgentes de los más pobres, la red de transporte no se estructure en función de favorecer la bicicleta? De nuevo la respuesta es que los grupos de ingresos más altos tienen el poder político y concentran los recursos públicos en la infraestructura para los automotores. El automóvil es tanto un símbolo de estatus como un medio de transporte. En principio los grupos con el poder de orientar la sociedad no están interesados ni en caminar ni en utilizar la bicicleta. Aunque eventualmente la disfruten, así como la integración ciudadana que trae consigo¹⁸.

De modo que aunque la ciudad sea pequeña y plana, el clima óptimo, sombrear las ciclorrutas con árboles frondosos sea fácil y sólo una minoría de la población disponga de automóvil particular, el diseño de la ciudad se estructura alrededor de vías para automotores, ignorando por completo las vías peatonales, con frecuencia aun los andenes, y prácticamente siempre las ciclorrutas. Esta carencia refleja la dependencia cultural, la ausencia de un modelo de ciudad apropiado y propio, pero principalmente la desigualdad de las sociedades subdesarrolladas. No es casualidad que las sociedades que dan más importancia a la bicicleta en el diseño urbano sean las del norte de Europa, que se caracterizan por su vocación igualitaria y de respeto al medio ambiente. Las ciudades del mundo en desarrollo generalmente tienen una densidad alta y por lo tanto allí los viajes son relativamente cortos. La construcción de redes de ciclorrutas de calidad puede construir calidad de vida y simbolizar una democracia más real.

Desde la perspectiva ambiental y de transporte, la bicicleta representa ventajas; pero quizás el aspecto más importante es su significado como medio de integración social y símbolo de respeto por la dignidad humana. Una ciudad hecha para la bicicleta también lo es para las sillas de ruedas, los patines y los triciclos. En términos urbanísticos, la visión que propongo de una ciudad

¹⁸Habría que tener en cuenta también los aspectos culturales, que se configuran en un modelo mental que se autoreforza

civilizada no es la que tiene autopistas, sino aquella en que un niño en un triciclo puede movilizarse con seguridad.

Competitividad

Me he referido a un modelo de ciudad pensado en función de la igualdad democrática, la integración social y la calidad de vida. Sin embargo, aunque no es el objetivo principal, la aplicación de semejante modelo obtiene algo adicional: competitividad. La ciudad se convierte así en terreno fértil para el desarrollo económico, porque atrae y retiene personas calificadas y creativas que son el factor determinante del crecimiento económico moderno. Igualmente atrae turismo, que es una fuente importante de empleo y de crecimiento. Y por supuesto que atrae las inversiones que requieren personas altamente calificadas¹⁹. En las sociedades agrícolas, la tierra era el factor determinante de la producción y la riqueza; en la etapa industrial, el capital era el factor crítico, y para atraerlo se otorgaban subsidios al crédito o protecciones comerciales. En la sociedad postindustrial o de la información, el conocimiento es el factor determinante del progreso económico y está vinculado a las personas. Una ciudad con solidaridad y armonía social, hermosa, con autoestima y con una gran calidad de vida, atrae de manera sostenida el desarrollo económico²⁰.

¹⁹Por “altamente calificado” se entiende aquellos que por sus conocimientos pueden conseguir visas y empleo en muchos lugares del mundo con relativa facilidad.

²⁰El proceso de jerarquización urbana, mediante el cual durante los últimos 100 años, principalmente en los países del mundo en desarrollo, unas ciudades se estancaron y perdieron importancia mientras que otras se convirtieron en grandes metrópolis, podría detenerse y aun revertirse parcialmente si los pueblos y ciudades pequeñas hicieran un gran esfuerzo por mejorar su calidad de vida: además de lo obvio, como son servicios públicos adecuados, excelentes escuelas, bibliotecas, centros deportivos, parques, aceras, vías peatonales, ciclorrutas, transporte público ordenado, cerros y frentes de agua bien aprovechados, avisos estrictamente reglamentados, arborización, podrían atraer turismo e inversiones y dar un vuelco a procesos de deterioro y pérdida de importancia aparentemente irreversibles.

A.3. Volver a Pensar en Grande en la Ética de la Equidad

Juan Luis Londoño de la Cuesta¹

Reflexionar sobre ética y equidad es una forma de recordar la importancia del poder de las ideas, pues sin creer en este poder no tendría sentido reflexionar sobre aquellas. Esto es particularmente relevante cuando los colombianos estamos dominados por el “síndrome de la imposibilidad”. Este síndrome, donde han convergido el estructuralismo, el macroanálisis y la pereza, produce un mensaje muy simple para la sociedad: el destino es inevitable. Por lo tanto no hay responsabilidad individual sobre el mejoramiento de las condiciones de la población. Y sólo importa el corto plazo para sobrevivir.

La reflexión sobre ética y equidad es importante especialmente cuando cambia el contexto en el que los hombres interactúan. Las posibilidades de equidad dependen sobre todo de la construcción de reglas de juego, un proceso colectivo por excelencia. La idea de mercados sin reglas de juego que conduzcan a la eficiencia o a la equidad es ingenua. En nuestra historia pueden diferenciarse dos momentos importantes y cabe preguntarse cuáles fueron las reglas de juego y la ética que los acompañaron. Entre finales de los 50 y mediados de los 80 hubo enormes progresos en materia distributiva y de reducción de pobreza, tal vez en ningún otro país del mundo la desigualdad del ingreso se redujo más, y en pocos países del mundo la pobreza disminuyó con más velocidad. Este proceso de avance equitativo permitió revertir la enorme inequidad que se generó entre los años veinte y los cincuenta. Cuáles fueron los dinamizadores de este proceso? Creo que fueron tres: primero, la aceleración del crecimiento económico; segundo, una revolución de la estructura agraria; y, tercero, una explosión educativa en los años 60 que no tuvo equivalente ni aún en los países asiáticos. Este proceso fue producido en parte de manera espontánea por el desarrollo económico y en parte significativa por acciones inducidas por el Estado, con mucha reorientación de la demanda hacia lo social y con nuevas normas, que es donde en este país se han concretado los valores sociales.

Esta mención histórica sirve para recordar que en una agenda por la equidad hay que valorar adecuadamente lo que ocurrió en el pasado, porque si no es fácil caer en el síndrome de la imposibilidad del desarrollo equitativo. El poder de los instrumentos se conoce por sus resultados y también cuando estos se debilitan. Quizá fue esto lo que pasó hace 10 años. Yo diría que en la última década, más que a falta de voluntad política, nos enfrentamos a un problema

¹Discurso pronunciado en el Lanzamiento de la Red Iberoamericana de Ética Empresarial y de las Organizaciones. Instituto Pensar. Universidad Javeriana. Bogotá, septiembre 2 de 1999, con leves correcciones de estilo por ojmm

de eficacia del estado. Les voy a traer a colación un ejemplo. Yo participé en el esfuerzo de conseguir 1 punto del PIB para distribuirlo a los más pobres. La ley 100 tenía ese propósito básico, y efectivamente movilizó 10 mil millones de dólares nuevos al sistema de salud, orientados por la ley a atender a los más pobres. Con ese esfuerzo se podría haber tenido coberturas universales. Pero en el camino se perdió al menos la mitad de la nueva plata. Y no casualmente, hoy nos quedan la mitad de los pobres sin atender. La eficiencia del Estado es, entonces, tan o más importante que la voluntad política. Y por ello en la agenda de la equidad, la reflexión sobre los instrumentos para lograrla puede ser tan importante como las orientaciones generales para lograrla.

Ahora la economía ha dado un giro importante. El período de crecimiento estable en un ambiente cerrado ha dado pie a otra fase contingente y globalizada, que parecería haber perdido la agenda para el desarrollo equitativo. Los economistas, los filósofos y los políticos parecen una vez más capturados por el síndrome de la imposibilidad, que nos condena otra vez a la violencia, la desigualdad y la pobreza. Me parece más bien que el cambio de época nos debería conducir a un cambio en las ideas y en la agenda. Para expresar mi idea en términos matemáticos, en la nueva época debemos pasar de la ética de la media o del promedio, a la ética de la varianza. Cuando nos acercamos a una década de enorme variabilidad del ingreso y de la actividad económica, deberíamos estarnos preparando a un cambio en el manejo de instrumentos por la equidad. Y propongo en esta discusión tres nuevos instrumentos.

Hay que dar un salto en materia de capital humano mucho más fuerte que el de los últimos 30 años. Ya no basta con educación primaria universal. Hoy es necesario que los muchachos terminen toda la carrera educativa. La Cepal ha encontrado que hoy en día el mejor seguro contra la pobreza es tener 12 o 13 años de educación. Por ello, es necesario mucha más educación en las escuelas, colegios y universidades para competir y para mejorar equidad. En la generación de un nuevo stock de capital humano, hay que pensar también más allá de las escuelas, pues ellas ocupan apenas la mitad del tiempo de la educación de un niño. La otra mitad son los medios de comunicación, con particular importancia de la televisión.

Más allá de la expansión de capital humano ampliado, es necesario enfrentar la inseguridad económica asociada con la varianza en el crecimiento. Para los riesgos individuales derivados de una economía volátil, no hay salida diferente a la expansión de la seguridad social. Nuestras instituciones de seguridad social han sido diseñadas para épocas estables de crecimiento que garantizaba recursos para grupos selectos de la población. El reto principal en épocas de alta inseguridad económica como las que se avecinan es buscar generalizaciones de la seguridad social que, al tiempo que sean sostenibles, promuevan la equidad sobre el segundo momento de la distribución del ingreso.

El tercer instrumento para empoderar los individuos en la nueva época es el fortalecimiento del capital. Por cierta tentación ludita y mala economía se ha pensado que redistribución era atacar las empresas y el capital con mayores impuestos. De lo que se trata, en el fondo, es de buscar que esas contingencias, o que esos clamores residuales que resultan siendo la propiedad del capital, sean repartidas adecuadamente. Por ello, la equidad en esta nueva época está asociada a mayor ahorro y a un mejor diseño de reglas de repartición contingentes, que resulten compatibles con mayor crecimiento y equidad. Por supuesto que esto plantea temas enormes. Un mercado de capitales más amplio y equitativo es, en mi opinión, la clave para el nuevo período que se avecina. La pérdida en los dos últimos años de la tercera parte del valor del capital del país plantea un reto muy interesante: cómo hacer que esta construcción de capital sea mucho más equitativa que en el pasado. El desarrollo de instrumentos financieros equitativos sofisticados permitiría dejar a un lado la vieja idea de ordeñar a las empresas a través de mucha tributación.

El contexto, entonces, ha cambiado. Estamos en un mundo de crecimiento contingente que nos debería llevar a dejar atrás la vana ilusión de tener una recuperación estable. En realidad, vamos a tener cinco años más de enorme fluctuaciones en nuestra economía. Cómo avanzar en la agenda de ética equitativa en el nuevo mundo globalizado? En éste, la redistribución tiene que estar basada un buen modelo económico, donde la redistribución del ingreso y de la riqueza sea mucho más compatible con el crecimiento eficiente y su sostenibilidad en el tiempo. El reciente libro de Nancy Birdsall y Carol Graham muestra que hay muchos instrumentos redistributivos que son eficientes en términos de generación de crecimiento.

Hay que eliminar de nuestras cabezas la idea que es imposible lograr equidad con crecimiento. Más bien, hay que buscar los instrumentos adecuados. Temas como la construcción de bienes públicos, los derechos de propiedad en el sentido clásico de derechos al riesgo tienen que ganar un mayor espacio en nuestra reflexión. En general, creo que un reto para los intelectuales es pensar otra vez en grande, como en los países europeos después de la destrucción de la guerra. El país parece incapacitado para pensar en nuevos términos ante la situación actual: cómo puede ser que después que la tasa de desempleo ha subido 10 puntos, que ha crecido en un millón el número de desempleados en un solo año, no hemos sido capaces de plantear una propuesta de política seria? Esa es una irresponsabilidad colectiva muy grande, de la cual somos culpables todos. Hay que plantear en grande la agenda por la equidad en un mundo globalizado. Sam Bowles, un profesor radical de la Universidad de Amherst, sostiene la tesis de que casualmente el mundo globalizado es más fácil hacer acciones redistributivas si estas son compatibles con la eficiencia. Gran parte de ello pasa por la provisión eficiente de bienes públicos, y el buen y eficiente manejo del

presupuesto con recursos públicos escasos. Se trata de enfrentar con mucha voz y con mucha fuerza a la corrupción. Cuando 8 millones de pobres colombianos se quedaron sin salud básica porque se les robaron la plata, no deberíamos quedarnos cruzados de brazos. Más bien, en el caso de la salud se ha descubierto un modelo que podría ser aplicado a otros campos: la combinación de recursos públicos y competencia en la provisión de los servicios con subsidio directo a la población más pobre. Este modelo permitiría a más gente pobre beneficiarse de los recursos públicos, ahora tan escasos.

Este modelo permite evitar aquél que sólo concibe la provisión pública, que parecería haber desviado los recursos de los pobres a grupos más pudientes de la población. No olvidemos que parte de los recursos de los pobres se fueron en aumentar los salarios de los grupos de la salud, no tan pobres, que aumentaron 55 % en términos reales en los últimos cinco años. Ahí está buena parte del problema.

En este mundo globalizado hay también necesidad de reducir con más fuerza la disparidad de los ingresos entre grupos diferentes al capital. Los estudios indican que gran parte de la desigualdad de los ingresos proviene del mercado de trabajo, que requiere reformas importantes en la búsqueda de mucha eficiencia, y de eliminación de privilegios a los grupos más altos de la población. En general, la globalización puede ser paradójicamente un muy buen escenario, con disciplina del mercado y de competencia internacional, para una agenda equitativa o para la búsqueda ética de una economía con mayor equidad con mayores posibilidades que antes. Si superamos la visión que todo puede hacerse con gasto público y con demanda, y pensemos en la eficiencia que puede provenir de la competencia y, en general, de políticas de oferta. Hay que pensar en mucha más equidad, pero juzgada menos en los términos tradicionales de ingresos monetarios, y más en términos de las capacidades individuales y, sobre todo, en términos de la capacidad de acción colectiva, en la cual los colombianos no hemos sido particularmente destacados.

El contexto para la reflexión ética hacia la equidad, entonces, ha cambiado. Paradójicamente, una época contingente y globalizada como la que comenzamos a transitar permitiría espacios mucho más interesantes en la búsqueda de una sociedad más equitativa. Pero aunque ha cambiado el contexto, no ha cambiado la responsabilidad, especialmente de los intelectuales. Buena parte de los problemas a los que nos enfrentamos creo con cariño se debe a la falta imaginación de los economistas, de los sociólogos, de los filósofos, de los políticos por igual. Hay necesidad de construir, y de construir con imaginación. El poder de las ideas para una agenda redistributiva es esencial. Me parece increíble que en el último año se haya generado más de tres millones de nuevos pobres, frente a la cual no hay una propuesta ni en el gobierno ni en el conjunto de la sociedad civil. En cuál ética esto es aceptable? Será otra expresión del Síndrome de la

Imposibilidad que sigue dominando a nuestros intelectuales? Insisto, superar este Síndrome es el principal límite para volver a pensar en grande y avanzar políticamente hacia la equidad.

A.4. La Tragedia de los comunes

Garrett Hardin ¹

Al final de un artículo muy bien razonado sobre el futuro de la guerra nuclear, J. B. Wiesner y H. F. York ² concluían que “ambos lados en la carrera armamentista se... confrontaban con el dilema de un continuo crecimiento del poderío militar y una constante reducción de la seguridad nacional. De acuerdo con nuestro ponderado juicio profesional, este dilema no tiene solución técnica. Si las grandes potencias continúan buscando soluciones exclusivamente en el área de la ciencia y la tecnología, el resultado será el empeorar la situación”. Me gustaría llamar su atención no sobre el tema de dicho artículo (seguridad nacional en un mundo nuclear) sino sobre el tipo de conclusiones a las que ellos llegaron: básicamente, que no existe solución técnica al problema. Una suposición implícita y casi universal de los análisis publicados en revistas científicas profesionales y de divulgación es que los problemas que se discuten tienen una solución técnica. Una solución de este tipo puede definirse como aquella que requiere un cambio solamente en las técnicas de las ciencias naturales, demandando pocos o casi nulos cambios en relación con los valores humanos o en las ideas de moralidad.

En nuestros días (aunque no en tiempos anteriores) las soluciones técnicas son siempre bienvenidas. A causa del fracaso de las profecías, se necesita valor para afirmar que una solución técnica deseada no es factible. Wiesner y York tuvieron esta valentía publicándolo en una revista científica, e insistieron en que la solución al problema no se iba a hallar en las ciencias naturales. Cautelosamente calificaron su afirmación con la frase “De acuerdo con nuestro ponderado juicio profesional...”. Si estaban en lo correcto o no, no es de relevancia para el presente artículo. Más bien, la preocupación aquí se refiere al importante conjunto de problemas humanos que pueden ser denominados “problemas sin solución técnica”, y de manera más específica, con la identificación y la discusión de uno de ellos.

Es fácil demostrar que el conjunto no está vacío. Recuerden el juego del “gato”. Considérese el problema ¿Cómo puedo ganar el juego del gato? Es bien sabido que no puedo si asumo (manteniéndome dentro de las convenciones de la teoría de juegos) que mi oponente entiende el juego a la perfección. Puesto de otra manera, no existe una “solución técnica” al problema. Puedo ganar solamente dándole un sentido radical a la palabra “ganar”. También puedo golpear a mi oponente en la cabeza o bien puedo falsificar los resultados. Cualquier forma

¹Este artículo fue publicado originalmente bajo el título “The Tragedy of Commons” en *Science*, v. 162 (1968), pp. 1243-1248. Traducción de Horacio Bonfil Sánchez. *Gaceta Ecológica*, núm. 37, Instituto Nacional de Ecología, México, 1995. <http://www.ine.gob.mx/>

²J. B. Wiesner y H. F. York. *Scientific American* 211 (4), 27, 1964.

en la que yo “gano” involucra, en algún sentido, un abandono del juego de la manera en que, también lo concebimos intuitivamente. (Puedo, desde luego, abandonar abiertamente el juego, negarme a jugarlo. Eso es lo que hacen la mayoría de los adultos).

El conjunto de los “problemas sin solución técnica” tiene miembros. Mi tesis es que el “problema poblacional”, tal como se concibe tradicionalmente, es un miembro de esta clase. Y dicha concepción tradicional requiere cierta reflexión. Es válido decir que la mayor parte de la gente que se angustia con el problema demográfico busca una manera de evitar los demonios de la sobrepoblación sin abandonar ninguno de los privilegios de los que hoy goza. Piensan que las granjas marinas o el desarrollo de nuevas variedades de trigo resolverán el problema “tecnológicamente”. Yo intento mostrar aquí que la solución que ellos buscan no puede ser encontrada. El problema poblacional no puede solucionarse de una manera técnica, de la misma forma que no puede ganarse el juego del gato.

¿Qué debemos maximizar?

La población, como lo dijo Malthus, tiende de manera natural a crecer “geométricamente”, o como decimos hoy, exponencialmente. En un mundo finito esto significa que la repartición per cápita de los bienes del mundo debe disminuir. ¿Es acaso el nuestro un mundo finito? Se puede defender con justeza la idea de que el mundo es infinito; o de que no sabemos si lo sea. Pero en términos de los problemas prácticos que hemos de enfrentar en las próximas generaciones con la tecnología previsible, es claro que aumentaremos grandemente la miseria humana si en el futuro inmediato, no asumimos que el mundo disponible para la población humana terrestre es finito. El “espacio” no es una salida.³

Un mundo finito puede sostener solamente a una población finita; por lo tanto, el crecimiento poblacional debe eventualmente igualar a cero. (El caso de perpetuas y amplias fluctuaciones por encima y por debajo del cero es una variante trivial que no necesita ser analizada). Cuando esta condición se alcance, ¿cuál será la situación de la humanidad? Específicamente ¿puede ser alcanzada la meta de Bentham de “el mayor bienestar para la mayor cantidad de individuos?” No, por dos razones, cada una suficiente por sí mismo. La primera es de orden teórico. No es matemáticamente posible maximizar dos variables (o más) al mismo tiempo. Esto fue claramente posible demostrado por von Neumann y Morgenstern,⁴ pero el principio queda implícito en la teoría de las ecuaciones diferenciales parciales, siendo tan viejo al menos como D’Alambert (1717-1783).

La siguiente razón surge directamente de los hechos biológicos. Para vivir, cualquier organismo debe disponer de una fuente de energía (comida, por

³G. Hardin, *Journal of Heredity* 50, 68 (1959), S. von Hoernor, *Science* 137, 18 (1962).

⁴J. von Neumann y O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior* (Princeton University Press, Princeton, N. J., 1947), p. 11.

ejemplo). Esta energía se utiliza para dos fines: conservación y trabajo. Un hombre requiere de aproximadamente 1600 kilocalorías por día (“calorías de manutención”) para mantenerse vivo. Cualquier cosa que haga aparte de eso se definirá como trabajo, y se apoya en las “calorías trabajo” que ingiera. Estas son utilizadas no solamente para realizar trabajo en el sentido en que comúnmente entendemos la palabra; son requeridas también para todas las formas de diversión, desde la natación y las carreras de autos, hasta tocar música o escribir poesía. Si nuestra meta es maximizar la población, es obvio lo que debemos hacer: lograr que las “calorías trabajo” por persona se acerquen a cero tanto como sea posible. Nada de comidas de gourmet, nada de vacaciones, nada de deportes, nada de música, nada de arte... Creo que cualquiera coincidirá, sin argumento o prueba, que maximizar la población no maximiza los bienes. La meta de Bentham es imposible. Para alcanzar esta conclusión he asumido el supuesto común de que el problema es la obtención de energía. La aparición de la energía atómica ha iniciado el cuestionamiento de esta suposición. Sin embargo, dada una fuente infinita de energía, el crecimiento poblacional sigue siendo una cuestión ineludible. El problema de la adquisición de energía es reemplazado por el de su disipación, como agudamente lo ha demostrado J. H. Fremlin.⁵ Los signos aritméticos del análisis están, como lo estuvieron, invertidos; pero la meta de Bentham sigue inalcanzable.

La población óptima es, por tanto, menor que el máximo. La dificultad para definir lo óptimo es enorme; hasta donde sé, nadie ha abordado este problema seriamente. Alcanzar una solución estable y aceptable seguramente requerirá de más de una generación de arduo trabajo analítico, y mucha persuasión.

Deseamos los máximos bienes por persona; ¿pero qué es un bien? Para una persona puede ser la naturaleza preservada, para otros centros de ski por mayor. Para una pueden ser estuarios donde se alimenten patos para caza, mientras que para otra pueden ser terrenos para fábricas. Comparar un bien con otro es, solemos decir, imposible, porque estos bienes son inconmensurables, y los inconmensurables no pueden compararse.

Teóricamente esto puede ser cierto, pero en la vida real los inconmensurables se miden. Solamente se necesita un criterio de juicio y un sistema de medición. En la naturaleza, dicho criterio es la supervivencia. ¿Es acaso mejor para una especie ser pequeña y fácil de esconder, o bien ser grande y poderosa? La selección natural mide lo inconmensurable. El compromiso alcanzado dependerá del sopesado natural de los valores de las variables.

El hombre debe imitar ese proceso. No hay duda del hecho de que ya lo hace, pero de manera inconsciente. Cuando las decisiones ocultas se hacen explícitas se inicia la discusión. El problema para los años venideros es lograr una

⁵J. H. Fremlin, *New Scientist*, núm. 415 (1964), p.285.

aceptable teoría de medición.

Los efectos sinérgicos, las variaciones no lineales, y las dificultades al dar por hecho el futuro vuelen difícil este problema intelectual, pero no lo tornan (en principio), insoluble.

¿Ha solucionado este problema práctico algún grupo cultural en nuestros tiempos, aunque sea en un nivel intuitivo? Un hecho simple prueba que ninguno lo ha logrado: no existe ninguna población próspera en el mundo de hoy que tenga, o haya tenido por algún tiempo, una tasa de crecimiento igual a cero. Cualquier pueblo que haya intuitivamente identificado su punto óptimo muy pronto lo alcanzará, después de lo cual su tasa de crecimiento alcanzará y permanecerá en cero.

Por supuesto, una tasa de crecimiento positiva puede tomarse como evidencia de que la población se encuentra por debajo de su óptimo. Sin embargo, bajo cualquier parámetro razonable, las poblaciones de más rápido crecimiento en el mundo actual son (en general) las más pobres. Esta asociación (que no es necesariamente invariable) siembra dudas sobre el supuesto optimista de que una tasa de crecimiento positiva indica que una población está en camino de encontrar su óptimo.

Poco progreso lograremos en la búsqueda de un tamaño óptimo de población mientras no exorcicemos de manera explícita al espíritu de Adam Smith en el campo de la demografía práctica. En asuntos económicos La riqueza de las naciones (1776) popularizó la “mano invisible”, la idea de un individuo que “buscando solamente su propio beneficio”, logra “dejarse llevar por una mano invisible a promover... el interés público”⁶. Adam Smith no afirmó que esto fuera invariablemente cierto, y quizás no lo hizo ninguno de sus seguidores. Pero contribuyó con una tendencia dominante de pensamiento que desde entonces interfiere con las acciones positivas basadas en análisis racionales, a saber la tendencia a asumir que las decisiones tomadas en lo individual serán, de hecho, las mejores decisiones para la sociedad en su conjunto. Si esta suposición es correcta justifica la continuidad de nuestra actual política de *laissez faire* en cuestiones reproductivas. Si es correcta podemos asumir que los hombre controlarán su fecundidad de tal manera que lograrán una población óptima. Si la suposición es incorrecta, necesitamos examinar las libertades individuales para ver cuáles son defendibles.

La tragedia de la libertad sobre los recursos comunes

La refutación de la mano invisible en el control poblacional se encuentra en un escenario descrito inicialmente en un panfleto poco conocido de 1833 por un matemático amateur llamado William Forster Lloyd (1794-1852)⁷. Podemos

⁶A. Smith, *The Wealth of Nations* (Modern Library, New York, 1937), p. 423 (Hay traducción del Fondo de Cultura Económica, México).

⁷W. F. Lloyd, *Two Lectures on the Checks to Population* (Mentor, NY., 1948), p. 17.

llamarlo “la tragedia de los recursos comunes”, utilizando la palabra tragedia como la usó el filósofo Whitehead: “La esencia de la tragedia no es la tristeza. Reside en la solemnidad despiadada del desarrollo de las cosas”. Y continúa diciendo: “Esta inevitabilidad del destino solamente puede ser ilustrada en términos de la vida humana por los incidentes que, de hecho, involucran infelicidad, pues es solamente a través de ellos que la futilidad de la huida puede hacerse evidente en el drama”⁸.

La tragedia de los recursos comunes se desarrolla de la siguiente manera. Imagine un pastizal abierto para todos. Es de esperarse que cada pastor intentará mantener en los recursos comunes tantas cabezas de ganado como le sea posible. Este arreglo puede funcionar razonablemente bien por siglos gracias a que las guerras tribales, la caza furtiva y las enfermedades mantendrán los números tanto de hombres como de animales por debajo de la capacidad de carga de las tierras. Finalmente, sin embargo, llega el día de ajustar cuentas, es decir, el día en que se vuelve realidad la largamente soñada meta de estabilidad social. En este punto, la lógica inherente a los recursos comunes inmisericordemente genera una tragedia.

Como un ser racional, cada pastor busca maximizar su ganancia. Explícita o implícitamente, consciente o inconscientemente, se pregunta, ¿cuál es el beneficio para mí de aumentar un animal más a mi rebaño? Esta utilidad tiene un componente negativo y otro positivo.

1. El componente positivo es una función del incremento de un animal. Como el pastor recibe todos los beneficios de la venta, la utilidad positiva es cercana a +1.
2. El componente negativo es una función del sobrepastoreo adicional generado por un animal más. Sin embargo, puesto que los efectos del sobrepastoreo son compartidos por todos los pastores, la utilidad negativa de cualquier decisión particular tomada por un pastor es solamente una fracción de -1.

Al sumar todas las utilidades parciales, el pastor racional concluye que la única decisión sensata para él es añadir otro animal a su rebaño, y otro más... Pero esta es la conclusión a la que llegan cada uno y todos los pastores sensatos que comparten recursos comunes. Y ahí está la tragedia. Cada hombre está encerrado en un sistema que lo impulsa a incrementar su ganado ilimitadamente, en un mundo limitado. La ruina es el destino hacia el cual corren todos los hombres, cada uno buscando su mejor provecho en un mundo que cree en la libertad de los recursos comunes. La libertad de los recursos comunes resulta la ruina para todos.

⁸A. N. Whitehead, *Science and the Modern World* (Mentor, New York, 1948), p.17

Para algunos esto puede ser un lugar común. ¡Ojalá y lo fuera! En cierto sentido esto fue aprendido hace miles de años, pero la selección natural favorece a las fuerzas de la negación psicológica.⁹ El individuo se beneficia como tal a partir de su habilidad para negar la verdad incluso cuando la sociedad en su conjunto, de la que forma parte, sufre. La educación puede contrarrestar la tendencia natural de hacer lo incorrecto, pero la inexorable sucesión de generaciones requiere que las bases de este conocimiento sean refrescadas constantemente.

Un simple incidente que sucedió hace pocos años en Leominster, Massachusetts, muestra cuan perecedero es este conocimiento. Durante la época de compras navideñas, los parquímetros de las zonas comerciales fueron cubiertos con bolsas de plástico con la leyenda: “No abrir hasta Navidad. Estacionamiento gratuito por parte del Alcalde y del Consejo Municipal”. En otras palabras, ante la perspectiva de un aumento en la demanda del espacio, ya de por sí escaso, los padres de la ciudad reinstituyeron el sistema de los recursos comunes. (Cínicamente sospechamos que ganaron más votos de los que perdieron con tan retrógrado acto).

De manera similar la lógica de los recursos comunes ha sido entendida por largo tiempo, quizás desde la invención de la agricultura o de la propiedad privada en bienes raíces. Pero ha sido comprendida principalmente en casos específicos que no son suficientemente generalizables. Incluso en nuestros días, ganaderos que rentan tierras nacionales en el Oeste demuestran apenas una comprensión ambivalente al presionar constantemente a las autoridades federales para que incrementen el número de cabezas autorizadas por área hasta un punto en el cual la sobreexplotación produce erosión y dominio de malezas. De manera similar, los océanos del mundo continúan sufriendo por la supervivencia de la filosofía de los recursos comunes. Las naciones marítimas todavía responden automáticamente a la contraseña de “la libertad de los mares”. Al profesar la creencia en los “inagotables recursos de los océanos”, colocan cerca de la extinción, una tras otra, a especies de peces y ballenas.¹⁰

Los parques nacionales son otra instancia donde se muestra la forma en que trabaja la tragedia de los recursos comunes. En el presente se encuentran abiertos para todos, sin ningún límite. Los parques en sí mismos tienen una extensión limitada -sólo existe un Valle de Yosemite- mientras que la población parece crecer sin ningún límite. Los valores que los visitantes buscan en los parques son continuamente erosionados. Es muy sencillo, debemos dejar de tratar a los parques como recursos comunes... o muy pronto no tendrán ningún valor para nadie.

¿Qué debemos hacer? Tenemos varias opciones. Podemos venderlos como pro-

⁹G. Hardin (ed.), *Population, Evolution, and Birth Control* (Freeman, San Francisco, Cal., 1964)

¹⁰McVay, *Scientific American* 216 (núm.8), 13 (1966).

propiedad privada. Podemos mantenerlos como propiedad pública, pero asignando adecuadamente quien ha de entrar. Esto debe ser con base en la riqueza, a través del uso de un sistema de adjudicación. También podría hacerse con base en méritos, definidos por estándares acordados. O podría ser por sorteo. O bien ser con base en el sistema de que el primero que llega entra, administrado a partir de filas. Estos, creo, son todos procedimientos objetables. Pero entonces debemos escoger, o consentir la destrucción de nuestros recursos comunes llamados parques nacionales.

La contaminación

De manera inversa, la tragedia de los recursos comunes reaparece en los problemas de contaminación. Aquí el asunto no es sacar algo de los recursos comunes, sino de ponerles algo dentro -drenajes o desechos químicos, radioactivos o térmicos en el agua; gases nocivos o peligrosos en el aire; anuncios y señales perturbadoras y desagradables en el panorama-. Los cálculos de los beneficios son muy semejantes a los antes mencionados. El hombre razonable encuentra que su parte de los costos de los desperdicios que descarga en los recursos comunes es mucho menor que el costo de purificar sus desperdicios antes de deshacerse de ellos. Ya que esto es cierto para todos, estamos atrapados en un sistema de “ensuciar nuestro propio nido”, y así seguirá mientras actuemos únicamente como libres empresarios, independientes y racionales.

La tragedia de concebir a los recursos comunes como una canasta de alimentos se desvirtúa con la propiedad privada, o con algo formalmente parecido. Pero el aire y el agua que nos rodean no se pueden cercar fácilmente, por lo que la tragedia de los recursos comunes al ser tratados como un pozo sin fondo debe evitarse de diferentes maneras, ya sea por medio de leyes coercitivas o mecanismos fiscales que hagan más barato para el contaminador el tratar sus desechos antes de deshacerse de ellos sin tratarlos. No hemos llegado más lejos en la solución de este problema que en el primero. De hecho, nuestro particular concepto de la propiedad privada, que nos impide agotar los recursos positivos de la tierra, favorece la contaminación. El dueño de una fábrica a la orilla de un arroyo -cuya propiedad se extiende a la mitad del mismo- con frecuencia tiene problemas para ver por qué no es su derecho natural el ensuciar las aguas que fluyen frente a su puerta. La ley, siempre un paso atrás de los tiempos, requiere cambios y adecuaciones muy elaboradas para adaptarse a este aspecto recientemente reconocido de los recursos comunes.

El problema de la contaminación es una consecuencia de la población. No importaba mucho la forma en que un solitario pionero americano liberara sus desechos. “El agua corriente se purifica a sí misma cada diez millas”, solía decir mi abuelo, y el mito estaba suficientemente cerca de la verdad cuando él era niño, porque no había mucha gente. Pero conforme la población se ha hecho más densa, los procesos naturales de reciclado tanto biológicos como químicos,

están ahora saturados y exigen una redefinición de los derechos de propiedad.

¿Cómo legislar la moderación?

El análisis del problema de la contaminación como una función de la densidad de la población descubre un principio de moralidad no siempre reconocido; específicamente: que la moralidad de un acto es una función del estado del sistema en el momento en que se realiza.¹¹ Usar los recursos comunes como un pozo sin fondo no daña a la población en general en zonas vírgenes o poco explotadas, simplemente porque no existe dicha población; el mismo comportamiento en una metrópolis es insostenible. Hace ciento cincuenta años un hombre de las praderas podía matar un bisonte americano, cortarle solamente la lengua para cenar y desechar el resto del animal. No se podría considerar en ningún sentido que fuera un desperdicio. Hoy en día, cuando quedan sólo algunos miles de bisontes, nos sentiríamos abrumados con este comportamiento. De paso, no tiene ningún valor que la moralidad de un acto no pueda ser determinada a partir de una fotografía. No se sabe si un hombre matando a un elefante o prendiéndole fuego a un pastizal está dañando a otros hasta que se conoce el sistema total dentro del que se incluye este acto. “Una imagen vale por mil palabras”, dijo un anciano chino; pero se llevaría diez mil palabras validar esto. Resulta tentador tanto para los ambientalistas como para los reformadores en general, el tratar de persuadir a otros por medio de imágenes fotográficas. Pero la esencia del argumento no puede ser fotografiada; debe ser presentada racionalmente: en palabras.

El que la moralidad es sensible a los sistemas escapó a muchos codificadores de la ética en el pasado. “No se debe.” es la forma tradicional de las directrices éticas que no abren posibilidades a las circunstancias particulares. Las leyes de nuestra sociedad siguen el patrón de la ética antigua, y por tanto, se adaptan pobremente para gobernar un mundo complejo, altamente poblado y cambiante. Nuestra solución epicíclica es abultar la ley estatutaria con la ley administrativa. Puesto que resulta prácticamente imposible mencionar todas las condiciones bajo las cuales es seguro quemar basura en el patio trasero o manejar un coche sin control anticontaminante, con las leyes delegamos los detalles a las oficinas. El resultado es una ley administrativa, la cual es lógicamente temida por la vieja razón -¿Quis custodiet ipsos custodes? ¿Quién ha de vigilar a los propios vigilantes-. John Adams señaló que debemos tener un “gobierno de leyes y no de hombres”. Los administradores, al tratar de evaluar la moralidad de los actos en la totalidad del sistema, están singularmente expuestos a la corrupción, generando un gobierno de hombres y no de leyes.

La prohibición es fácil de legislar (pero no necesariamente fácil de imponer); pero ¿cómo legislar la moderación? La experiencia indica que ésta puede ser

¹¹J. Fletcher, *Situation Ethics* (Westminster, Philadelphia, 1966)

alcanzada mejor a través de la acción de la ley administrativa. Limitamos innecesariamente las posibilidades si suponemos que los sentimientos de Quis custodiet nos niegan el uso de la ley administrativa. Deberíamos mejor tener la frase como un perpetuo recordatorio de temibles peligros que no podemos evitar. El gran reto que tenemos ante nosotros es cómo inventar las retroalimentaciones correctivas que se requieren para mantener honestos a nuestros guardianes. Debemos encontrar maneras de legitimar la necesaria autoridad tanto para los custodios como para las retroalimentaciones correctivas.

La libertad de reproducción es intolerable.

La tragedia de los recursos comunes se relaciona con los problemas de población de otra manera. En un mundo regido únicamente por el principio de “perro come perro”-si en efecto alguna vez existió tal mundo- el número de hijos por familia no sería un asunto público. Los padres que se reprodujeran escandalosamente dejarían menos descendientes, y no más, porque serían incapaces de cuidar adecuadamente a sus hijos. David Lack y otros han encontrado que esa retroalimentación negativa controla de manera demostrable la fecundidad de los pájaros¹². Pero los hombres no son pájaros, y no han actuado como ellos por milenios, cuando menos.

Si cada familia humana dependiera exclusivamente de sus propios recursos, si los hijos de padres no previsores murieran de hambre, si, por lo tanto, la reproducción excesiva tuviera su propio “castigo” para la línea germinal: entonces no habría ninguna razón para que el interés público controlara la reproducción familiar. Pero nuestra sociedad está profundamente comprometida con el estado de bienestar,¹³ y por tanto confrontada con otro aspecto de la tragedia de los recursos comunes.

En un estado de bienestar ¿cómo tratar con la familia, la religión, la raza o la clase (o bien con cualquier grupo cohesivo y distinguible) que adopte a la sobrerreproducción como política para asegurar su propia ampliación¹⁴? Equilibrar el concepto de libertad de procreación con la creencia de que todo el que nace tiene igual derecho sobre los recursos comunes es encaminar al mundo hacia un trágico destino.

Desafortunadamente ese es justamente el curso que persiguen las Naciones Unidas. A fines de 1967, unas treinta naciones acordaron lo siguiente: “La declaración Universal de los Derechos Humanos describe a la familia como la unidad natural y fundamental de la sociedad. Por consecuencia, cualquier decisión en relación con el tamaño de la familia debe residir irrevocablemente

¹²D. Lack, *The Natural Regulation of Animal Numbers* (Clarendon Press, Oxford England, 1954).

¹³H. Girvetz, *From Wealth to Welfare* (Stanford University Press, Stanford, Cal., 1950).

¹⁴G. H. *Perspectives in Biology and Medicine*, 6, 366 (1963).

en la propia familia, y no puede ser asumida por nadie más”¹⁵.

Es doloroso tener que negar categóricamente la validez de este derecho; al negarlo, uno se siente tan incómodo como un habitante de Salem, Massachusetts, al negar la existencia de las brujas en el siglo XVII. En el presente, en los cuarteles liberales, algo como un tabú actúa para inhibir la crítica a las Naciones Unidas. Existe un sentimiento de que Naciones Unidas son nuestra “última y mejor esperanza”, y que no debemos encontrar fallas en ella; de que no debemos caer en manos de archiconservadores. Sin embargo, no hay que olvidar lo que dijo Robert Louis Stevenson: “La verdad que esconden los amigos es la mejor arma para el enemigo”. Si amamos la verdad debemos negar abiertamente la validez de la Declaración de los Derechos Humanos, aun cuando sea promovida por las Naciones Unidas. Deberíamos unirnos a Kingsley Davis¹⁶ en el intento de tener una población mundial planificada por los padres para ver el error en sus opciones al abrazar el mismo trágico ideal.

La conciencia es autoeliminante

Es un error pensar que podemos controlar el crecimiento de la humanidad en el largo plazo haciendo un llamado a la conciencia. Charles Galton Darwin señaló esto cuando habló en el centenario de la publicación del gran libro de su abuelo. El argumento es claro y darwiniano.

La gente varía. Al confrontarse con los llamamientos para limitar la reproducción, algunas gentes indudablemente responderán más que otros a la súplica. Aquellos que tengan más hijos producirán una fracción más grande para la siguiente generación que aquellos con conciencias más susceptibles. Las diferencias se acentuarán, generación tras generación.

En palabras de C. G. Darwin: “Bien puede tomar cientos de generaciones para que el instinto progenitivo se desarrolle en este sentido, pero de lograrse, la naturaleza ya habría cobrado venganza, y la variedad *Homo contraciens* se habría extinguido y habría sido remplazada por la variedad *Homo progenitivus*”¹⁷.

El argumento supone que la conciencia o el deseo de tener hijos (no importa cuál) es hereditario, pero hereditario solamente en el sentido formal más general. El resultado será el mismo si la actitud es transmitida a través de las células germinales o extrasomáticamente, para usar el término de A. J. Lotka. (Si se niega la segunda posibilidad al igual que la primera, entonces ¿cuál es el sentido de la educación?) El argumento aquí ha sido señalado dentro del contexto del problema demográfico, pero es válido igualmente para cualquier situación en la que la sociedad inste a un individuo que explota los recursos

¹⁵U. Thant, *International Planned Parenthood News*, núm. 168 (febrero de 1968)

¹⁶K. Davis, *Science* 158, 730 (1967)

¹⁷S. Tax (ed.) *Evolution After Darwin* (University of Chicago Press, Chicago, 1960), vol. 2, p. 469.

comunes a que se restrinja por el bien general, por medio de su conciencia. Hacer ese llamado es montar un sistema selectivo que trabaje por la eliminación de la conciencia de la raza.

Efectos patogénicos de la conciencia

Las desventajas a largo plazo de un llamado a la conciencia deberían ser suficientes para condenarlo; pero también tiene serias desventajas en el corto plazo. Si le pedimos a un hombre que está explotando los recursos comunes que desista de hacerlo “en nombre de la conciencia” ¿qué estamos haciendo? ¿qué está escuchando? -no sólo en el momento sino también en las pequeñísimas horas de la noche cuando, medio dormido, recuerda no solamente las palabras que le dijimos, sino las pistas de comunicación no verbal que le dimos sin percatarnos-. Tarde o temprano, consciente o subconsciente, este hombre percibe que ha recibido dos comunicados, y que son contradictorios: 1. (el comunicado pretendido) “Si no haces lo que te pedimos, te condenaremos abiertamente por no actuar como un ciudadano responsable”. 2. (el comunicado no pretendido) “Si te comportas como te pedimos, secretamente te condenaremos como un tonto que puede ser humillado a tal punto de hacerse a un lado mientras el resto de nosotros explota los recursos comunes”.

Todo hombre se encuentra atrapado en lo que Bateson ha llamado un “doble mensaje” como un importante factor causal en la génesis de la esquizofrenia¹⁸. El mensaje doble puede no ser siempre tan dañino, pero constantemente amenaza la salud mental de cualquiera que lo recibe. “Una mala conciencia -dijo Nietzsche- es una clase de enfermedad”.

Conjurar la conciencia de los demás es tentar a cualquiera que desee extender su control más allá de los límites legales. Los líderes en los más altos niveles sucumben a esta tentación. ¿Ha evitado algún presidente durante las últimas generaciones caer en llamados a los sindicatos para que voluntariamente moderen sus demandas por mejores salarios, o a las compañías acereras para que bajen voluntariamente sus precios? No puedo recordar ninguno. La retórica utilizada en dichas ocasiones está diseñada para producir sentimientos de culpa en los no cooperadores.

Por siglos se asumió sin prueba que la culpa era un valioso, incluso casi indispensable, ingrediente de la vida civilizada. Ahora, en este mundo postfreudiano, lo dudamos.

Paul Goodman habla desde un punto de vista moderno cuando dice: “Nada bueno ha salido del sentimiento de culpa, ni inteligencia, ni política, ni compasión. Los que sienten culpa no prestan atención al objeto, sino solamente a sí mismos, y ni siquiera a sus propios intereses, lo que podría tener sentido,

¹⁸G. Bateson, D. D. Jackson, J. Haley, J. Weakland, *Behavioral Science*, 1, 251 (1956).

sino a sus ansiedades”¹⁹.

Uno tiene que ser un psiquiatra profesional para ver las consecuencias de la ansiedad. Nosotros en Occidente estamos emergiendo apenas de una espantosa etapa de dos siglos de oscurantismo de Eros que estuvieron sustentados parcialmente en leyes prohibitivas, pero quizás más efectivamente en los mecanismos educativos generadores de ansiedad. Alex Comfort ha contado bien la historia en *The Anxiety Makers*²⁰ y no es una historia agradable.

Puesto que la prueba es difícil podríamos incluso conceder que los resultados de la ansiedad pueden, en algunos casos, desde cierto punto de vista, ser deseables. La pregunta más amplia que debemos hacernos es si, como un asunto de política, deberíamos alguna vez propiciar el uso de una técnica cuya tendencia (sino su intención), es psicológicamente patogénica. Oímos hablar mucho en estos días sobre la paternidad responsable; el par de palabras son incorporados en los títulos de algunas organizaciones dedicadas al control natal. Algunas gentes han propuesto campañas masivas de propaganda para inculcar la responsabilidad en los futuros reproductores de la nación (o del mundo). ¿Pero cuál es el sentido de la palabra conciencia? Cuando utilizamos la palabra responsabilidad en ausencia de sanciones sustanciales, ¿no estamos tratando de intimidar a un hombre que se encuentra en los recursos comunes para que actúe en contra de su propio interés? La responsabilidad es una falsedad verbal para un *quid pro quo* sustancial. Es un intento para obtener algo por nada. Si la palabra responsabilidad se llega a usar, sugiero que debe ser en el sentido en que Charles Fraenkel la usaba²¹. “Responsabilidad -dice este filósofo-, es el producto de arreglos sociales definidos”.

Observen que Fraenkel habla de arreglos sociales, no de propaganda.

Coerción mutua, mutuamente acordada

Los arreglos sociales que producen responsabilidad son arreglos que generan coerción de algún tipo. Considérese el robo de un banco. El hombre que se lleva el dinero del banco actúa como si el banco fuera parte de los recursos comunes. ¿Cómo prevenir tal acción? Ciertamente no intentando controlar su comportamiento exclusivamente con base en llamados verbales a su sentido de responsabilidad. En vez de basarnos en propaganda seguimos el consejo de Fraenkel e insistimos en que el banco no forma parte de los bienes comunes; buscamos arreglos sociales definidos que mantendrán al banco fuera de ese ámbito. El que al hacer esto infringimos la libertad de los ladrones potenciales, no lo negamos ni lo lamentamos.

La moralidad de un asalto a un banco es particularmente fácil de entender porque aceptamos la prohibición total de esta actividad. Estamos de acuerdo

¹⁹P. Goodman, *New York Review of Books* 10 (8), 22 (23 de mayo de 1968).

²⁰A. Comfort, *The Anxiety Makers* (Nelson, Londres, 1967).

²¹C. Frankel, *The Case for Modern Man* (Harper & Row, New York, 1955), p.203.

en decir “No robarás un banco”, sin excepciones. Pero la moderación también puede ser generada por medio de la coerción. El cobro de impuestos es un buen medio coercitivo. Para mantener a los compradores moderados en el uso de espacios de estacionamiento en el centro de la ciudad, colocamos parquímetros para periodos cortos y multas de tráfico para periodos largos. Realmente no necesitamos prohibirle al ciudadano estacionarse tanto tiempo como desee simplemente necesitamos que sea cada vez más caro hacerlo. No es la prohibición, sino opciones cuidadosamente orientadas las que le ofrecemos. Un hombre de la Avenida Madison puede llamarlo persuasión; yo prefiero el mayor candor de la palabra coerción.

Coerción es una palabra sucia para la mayoría de los liberales de hoy, pero no necesita serlo por siempre. Como en el caso de otras palabras, su suciedad puede limpiarse por medio de la exposición a la luz, es decir, diciéndola una y otra vez sin apología o vergüenza. Para muchos, la palabra coerción implica decisiones arbitrarias de burócratas distantes e irresponsables; pero esto no es necesariamente parte de su significado. La única clase de coerción que yo recomiendo es la coerción mutua, mutuamente acordada por la mayoría de las personas afectadas.

Decir que acordamos la mutua coerción no es decir que requerimos disfrutarla o incluso, pretender disfrutarla. ¿Quién disfruta los impuestos? Todos nos quejamos de ellos. Pero aceptamos los impuestos obligatorios porque reconocemos que los impuestos voluntarios favorecerían la inconsciencia. Instituímos y (gruñendo) apoyamos los impuestos y otros medios coercitivos para escapar de los horrores de los recursos comunes.

Una alternativa a los recursos comunes no necesita ser perfectamente justa para ser preferible. Con bienes raíces u otros bienes materiales, la alternativa que hemos escogido es la institución de la propiedad privada emparejada con la herencia legal. ¿Es este un sistema perfectamente justo? Como biólogo entrenado en genética niego que el sistema lo sea. Me parece, que sí deben existir diferencias entre las herencias de los individuos, la posesión legal debería estar perfectamente correlacionada con la herencia biológica -que aquellos individuos que son biológicamente más aptos para ser custodios de la propiedad y del poder deberían legalmente heredar más-. Pero la recombinación genética hace continuamente burla de la doctrina “de tal padre, tal hijo” implícita en nuestras leyes de herencia legal. Un idiota puede heredar millones, y los fondos de una empresa pueden mantenerse intactos. Debemos admitir que nuestro sistema legal de propiedad privada más herencia es injusto, pero nos quedamos con él porque no estamos convencidos, por el momento, de que alguien haya inventado un sistema mejor. La alternativa de los recursos comunes es demasiado aterradora para contemplarse. La injusticia es preferible a la ruina total.

Esta es una de las peculiaridades del enfrentamiento entre la reforma y el status quo que está irreflexivamente gobernada por una doble norma. Frecuentemente una reforma es derrotada cuando sus oponentes encuentran triunfalmente una falla en ella. Como lo señaló Kingsley Davis²² los creadores del status quo suponen algunas veces que ninguna reforma es posible sin un acuerdo unánime, una suposición contraria a los hechos históricos. Tan claro como lo puedo poner, el rechazo automático a las reformas propuestas se basa en dos suposiciones inconscientes: 1) que el status quo es perfecto; o bien 2) que la elección que encaramos es entre la reforma y la no acción; si la reforma propuesta es imperfecta, supuestamente no deberíamos tomar decisión alguna, y esperar una propuesta perfecta.

Pero no podemos dejar de hacer algo. Eso que hemos hecho por cientos de años es también acción. Claro que produce males. Una vez que estamos prevenidos de que el status quo es una acción podremos descubrir las ventajas y desventajas de la reforma propuesta, haciendo la mejor aritmética posible dada nuestra falta de experiencia.

Con base en esa comparación, podemos tomar una decisión racional que no involucrará la suposición inmanejable de que sólo los sistemas perfectos son tolerables.

Reconocimiento de la necesidad

Quizás el resumen más sencillo del problema de la población humana es el siguiente: los recursos comunes, si acaso justificables, son justificables solamente bajo condiciones de baja densidad poblacional. Conforme ha aumentado la población humana han tenido que ser abandonados en un aspecto tras otro.

Primero abandonamos los recursos comunes en recolección de alimentos, cercando las tierras de cultivo y restringiendo las áreas de pastoreo, caza y pesca. Estas restricciones no han terminado aún en todo el mundo.

De alguna manera, poco después vimos que los recursos comunes como áreas para deposición de basura también tenían que ser abandonados. Las restricciones para la eliminación de desechos domésticos en el drenaje son ampliamente aceptadas en el mundo occidental; continuamos en la lucha para cerrar esos espacios a la contaminación por automóviles, fábricas, insecticidas en aerosol, aplicación de fertilizantes y centrales de energía atómica.

En un estado aún más embrionario se encuentra nuestro reconocimiento a los peligros de los recursos comunes en cuestiones de esparcimiento. Casi no existen restricciones a la propagación de ondas de sonido en el medio público. El consumidor es asaltado por música demencial sin su consentimiento. Nuestro gobierno ha gastado miles de millones de dólares en la creación de transporte

²²Véase J. D. Roslansky, *Genetics and the Future of Man* (Appleton-Century-Crofts, New York, 1966), p. 177.

supersónico que podría molestar a 50,000 personas por cada individuo transportado de costa a costa tres horas más rápido. Los anuncios ensucian y las ondas de radio y televisión contaminan la vista de los viajeros. Estamos muy lejos de prohibir los recursos comunes para cuestiones de recreación. ¿Se deberá esto a nuestra herencia puritana, que nos hace considerar el placer como un pecado y el dolor (en este caso la contaminación de la publicidad) como un signo de virtud?

Cada nueva restricción en el uso de los recursos comunes, implica restringir la libertad personal de alguien. Las restricciones impuestas en un pasado distante son aceptadas porque ningún contemporáneo se queja por su pérdida. Es a las recientemente propuestas a las que nos oponemos vigorosamente; los gritos de “derechos” y de “libertad” llenan el aire. ¿Pero qué significa libertad? Cuando los hombres mutuamente acordaron instaurar leyes contra los robos, la humanidad se volvió más libre, no menos. Los individuos encerrados en la lógica de los recursos comunes son libres únicamente para traer la ruina universal; una vez que ven la necesidad de la coerción mutua, quedan libres para perseguir nuevas metas. Creo que fue Hegel quien dijo: “La libertad es el reconocimiento de la necesidad”.

El aspecto más importante de la necesidad que debemos ahora reconocer es la necesidad de abandonar los recursos comunes, en la reproducción. Ninguna solución técnica puede salvarnos de las miserias de la sobrepoblación. La libertad de reproducción traerá ruina para todos. Por el momento, para evitar decisiones difíciles muchos de nosotros nos encontramos tentados para hacer campañas de concienciación y de paternidad responsable. Podemos resistir la tentación porque un llamado a la actuación de conciencias independientes selecciona la desaparición de toda conciencia a largo plazo, y aumenta la ansiedad en el corto.

La única manera en que nosotros podemos preservar y alimentar otras y más preciadas libertades es renunciando a la libertad de reproducción, y muy pronto. “La libertad es el reconocimiento de la necesidad”, y es el papel de la educación revelar a todos la necesidad de abandonar la libertad de procreación. Solamente así podremos poner fin a este aspecto de la tragedia de los recursos comunes.

A.5. Externalidades y Bienes Públicos

Traducción libre de Wikipedia [2006].

En Economía ocurre una externalidad cuando una decisión, como por ejemplo alguna actividad que contamine la atmósfera, causa costos o beneficios a otros actores diferentes a la persona que toma la decisión. Es común que aparezcan del uso de bienes comunes o públicos, aunque no necesariamente. Cuando aparecen externalidades, quien decide no incurre en todos los costos o no recibe todos los beneficios derivados de su acción. En consecuencia desde el punto de vista de toda la sociedad el resultado es sobre-consumo o sub-consumo, bajo las leyes de la oferta y la demanda en un mercado competitivo. Si todo el mundo que rodea a la persona que toma la decisión se beneficia más que ella, como por ejemplo en educación o en seguridad, entonces el bien será sub-consumido desde el punto de vista público. Si por el contrario, el costo para el resto del mundo es mayor que el costo que la persona incurre, como por ejemplo en casos de contaminación o crimen, entonces el bien será sobre-consumido desde el punto de vista público.

La mayoría de los economistas acepta que la existencia de una externalidad afecta el comportamiento del mercado. Los economistas entienden el intercambio voluntario como una actividad que beneficia a ambas partes. Pero cuando hay lugar a externalidades, quienes sufren lo hacen contra su voluntad y quienes se benefician lo reciben libremente (gratis). Por ejemplo quien disfruta de un vestido que está usando otra persona o quien sufre por un olor desagradable resultado de una producción agrícola. Desde la perspectiva de un planificador social esto significa un comportamiento no óptimo desde el punto de vista social.

Quien recibe un costo externo lo experimenta como una violación de sus derechos, de su propiedad, de su libertad. Normalmente aparece en situaciones en las cuales no hay adecuada definición de los derechos.

Por el otro lado, un beneficio externo es probable que sea visto por quien lo recibe como un don, algo que le aumenta la libertad, las opciones para él escoger. En algunos casos puede percibirse como un beneficio gratuito y puede haber lugar a resistencia de parte de quienes están acostumbrados a recibirlo en caso de que desaparezca tal beneficio externo, con su ineficiencia asociada. El valor de las consecuencias de una externalidad difícilmente puede calcularse de una manera técnica por los economistas, puesto que refleja los puntos de vista éticos y las preferencias de toda la población. En lugar de esto, en los países organizados sobre la soberanía popular, se requiere algún procedimiento democrático para poder valorar los costos y los beneficios de las externalidades. Algunos teóricos del libre cambio, como Friedrich von Hayek y Milton Friedman se han referido a las externalidades como efectos de vecindad o vertimientos.

Pero no se debe pensar que las externalidades sean pequeñas, vertiendo sólo a la vecindad. Pueden ser inmensas y afectar a todo el planeta, como las causadas por el calentamiento global.

Por fuera de la tradición liberal, los marxistas ven externalidades en todo. Para ellos la producción es social, totalmente inter-dependiente; mientras que, bajo el capitalismo, la apropiación es privada. Para vencer esta contradicción, los marxistas reclaman una planificación central de todas las decisiones económicas, planificación que se presenta como una planificación democrática. Punto en el cual hay lugar a mayores dudas, precisamente por las experiencias negativas.

Algunos ejemplos de externalidades:

- Contaminación producida por una compañía en el curso de su producción y que causa malestar a otros. Este caso se conoce como una externalidad negativa, o un costo externo o una des-economía externa.
- En una compañía para ahorrar costos de su departamento de correo interno le pide a cada empleado que reclame su correspondencia. Efectivamente el departamento de correo interno obtiene un ahorro, pero la compañía sufre un sobre-costos por el tiempo pedido de los empleados. Esta pérdida es el costo externo para el departamento de correo interno.
- La captura de una compañía pesquera disminuye el recurso para todas las demás compañías y puede conducir a sobre-explotación del recurso. Este es un caso de un bien público que se bautizado con el nombre de la tragedia de los comunes (ver Sección A.4).
- Una persona que siembra un bonito jardín frente a su casa puede proporcionarle beneficio a otros que vivan en el área. Este es un ejemplo de una externalidad positiva. También se denomina beneficio externo, economía externa. Los bienes que tienen externalidades positivas también se llaman bienes meritorios.
- Un individuo que compra un video-teléfono, cuando la tecnología apenas está empezando a penetrar, va a incrementar la utilidad de tales teléfonos para personas que lo quieran llamar, lo que puede aumentar la penetración de la tecnología. Esta externalidad positiva se conoce con el nombre de externalidad de red.
- Una compañía puede deliberadamente sub-financiar una rama de su operación, tal como sus pensiones o prestaciones sociales, con el propósito de que esos costos se trasladen a alguien diferente, por ejemplo a los contribuyentes. Esto crea una externalidad. Aparentemente los gobiernos tienen la tendencia a actuar de esta manera.
- Un especulador inmobiliario puede comprar un gran número de casas en una vecindad, lo que hace subir los precios y por tanto perjudicando

a otros que quieren adquirir vivienda y eventualmente recluyéndolos. A esta externalidad la denominan pecuniaria.

En Economía las externalidades son muy importantes porque pueden llevar a ineficiencia económica. Como los productores de externalidades no tienen un incentivo para tener en cuenta el efecto de sus acciones sobre los demás, el resultado de sus decisiones será ineficiente desde el punto de vista social. Habrá exceso de actividades que causan externalidad negativa, como por ejemplo contaminación, y habrá poca actividad que causa externalidad positiva; excesos y faltas con respecto a un resultado óptimo para la sociedad. Como se dijo, los costos externos van a generar conflictos políticos, demandas y litigios que pueden atentar contra la convivencia. El asunto puede ser lo suficientemente complejo como para que el concepto del óptimo de Pareto sea inaplicable.

La mayoría de las externalidades más importantes en la economía se relacionan con asuntos ambientales y bienes públicos.

El análisis económico tradicional de las externalidades se puede ilustrar en un diagrama estándar de curvas de oferta y de demanda, asumiendo que la externalidad se puede valorar en términos monetarios. En este caso se agrega una curva extra de oferta o de demanda según el caso. Una de las curvas es la curva privada, la que el agente percibe, desde su propia perspectiva. La otra es la curva que involucra además el costo social. En el caso de las curvas de oferta, la privada refleja el costo marginal del productor. En la curva social, o pública, a este costo se le agrega el costo marginal externo para la sociedad, es decir el costo extra en que la sociedad incurre si se produce una unidad adicional del bien en cuestión. De manera semejante si son curvas de demanda. La curva privada refleja la disponibilidad a pagar del consumidor, su beneficio como consumidor privado; mientras que la curva social o pública refleja además el beneficio externo que la sociedad recibe.

La Figura A.1 ilustra el caso de una externalidad negativa. Por ejemplo una actividad industrial que contamina el medio ambiente, por ejemplo una central de generación de electricidad a carbón. Esta empresa vende electricidad y su curva de costos marginales está representada en la gráfica por la curva DA , esta curva representa también su curva de oferta, la cantidad electricidad que está dispuesta a vender en función del precio. La curva de demanda está representada por la curva EBA , que representa la cantidad que el mercado está dispuesta a comprar en función del precio. En una situación de equilibrio, si el único productor fuera nuestra central a carbón, el precio será p_A y la cantidad será q_A , punto A de la Figura. La externalidad negativa se refleja en la curva de oferta social CB . El costo marginal adicional para la sociedad para una cantidad dada corresponde a la distancia vertical entre las dos curvas de oferta. Se asume que no hay otros beneficios externos para los consumidores.

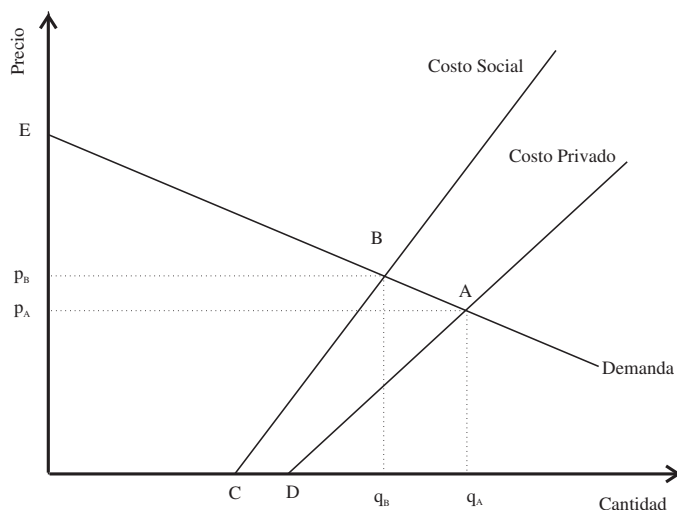


Figura A.1: Esquema de curvas de demanda y oferta privada y social para ilustrar una externalidad negativa. Adaptada de Wikipedia [2006].

El equilibrio para la curva de oferta social corresponde al punto B , el precio del equilibrio social p_B es mayor que p_A y la cantidad q_B es menor. El punto B es más eficiente que el punto A , lo que se representa por el exceso de energía producido entre la situación privada y la pública. El costo adicional debido a la externalidad no es percibido por los agentes privados pero existe, y por tal razón la situación de equilibrio social da lugar a un precio más alto (internaliza el costo adicional) y a una menor cantidad consumida. La idea es que el óptimo para toda la sociedad se presenta cuando el beneficio marginal de los consumidores (representado por la curva de demanda) es igual al costo marginal para toda la sociedad. Para la cantidad q_A el costo marginal social es mayor que el beneficio marginal, por eso la producción debería reducirse hasta q_B . La ineficiencia se manifiesta en que se está vendiendo y comprando mucha electricidad generada con carbón, lo que conduce al costo externo por efecto invernadero.

Esta discusión ilustra que el problema de la contaminación es algo más que un problema de ética, involucra otras cosas además de la maximización de las utilidades de una firma. El problema es que los costos marginales privados y públicos o sociales no coinciden, lo que conduce a que el mercado —la ley de la oferta y la demanda, la competencia— produzca un equilibrio sub-óptimo, ineficiencia económica. En un mercado monopolista de un bien inelástico es posible que para elevar sus utilidades la firma restrinja su producción, lo que eventualmente beneficie a la sociedad, aunque a costa de los consumidores.

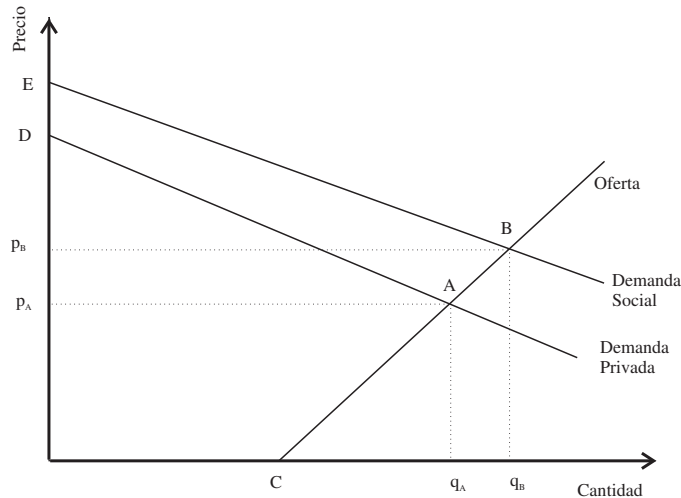


Figura A.2: Esquema de curvas de demanda privada y social y curva de oferta para ilustrar una externalidad positiva. Adaptada de Wikipedia [2006].

En ambiente de competencia un productor privado no tiene opción sino la de producir de acuerdo a los incentivos del mercado, es decir a sus costos privados. La única solución está en cabeza del gobierno mediante impuestos u otros mecanismos.

La Figura A.2 representa una situación de una externalidad positiva, por ejemplo para el caso de una vacuna contra una enfermedad contagiosa. La industria productora de las vacunas las vende a precios de competencia, de acuerdo a la curva de oferta CAB . La externalidad resulta del beneficio extra que recibe otras personas cuando alguien se aplica la vacuna, lo que reduce la probabilidad de contagio, aun si él mismo no se vacuna. El beneficio social se representa por la distancia vertical entre la curva de demanda pública o social (EB) y la curva de demanda privada (DA). Este es un caso en el cual, el todo es mayor que la suma de las partes. Para facilitar el análisis se asume que no hay otras externalidades y que es posible valorar y monetizar el beneficio externo en la curva de demanda pública (EB). Si los consumidores sólo tienen en cuenta su propio beneficio privado, el mercado conduce al equilibrio representado por q_A , al precio p_A , en lugar del equilibrio socialmente más eficiente del punto B , con una mayor cantidad de personas vacunadas q_B y un precio mayor p_B .

En ambos ejemplos no hemos incorporado consideraciones sobre quien paga y quien recibe los beneficios. En general el gobierno tiene que participar para establecer tributos o subsidios y hacerlos llegar a quien realmente corresponde. El asunto de los beneficios externos se relaciona con los llamados bienes públi-

cos, es decir bienes para los cuales no es posible o es muy difícil excluir de los beneficios de su consumo. La producción de bienes públicos trae externalidades positivas para todos, o casi todos. Los bienes públicos tienen dos propiedades. En primer lugar no generan rivalidad entre los consumidores, es decir una vez que se producen cualquiera puede beneficiarse sin disminuir la posibilidad de otros de hacer lo mismo. En segundo lugar son no excluibles, una vez se crearon es imposible o muy difícil evitar que haya acceso a ellos. Los bienes públicos puros poseen ambas propiedades absolutamente. Algunos ejemplos son la seguridad nacional, la justicia, la democracia, los derechos, el aire limpio, la señalización de una vía o un faro. Los bienes públicos son para todos. Aunque alguien quiera, es difícil producir bienes públicos con ánimo de lucro porque el mercado no es capaz de incluir eficientemente las grandes externalidades asociadas a estos. Los bienes colectivos no son públicos, sino para un subconjunto de la sociedad. La mayoría de los bienes llamados públicos por los economistas no lo son en sentido estricto, se restringen a una localidad. Lo opuesto a un bien público es un bien privado, que es excluible y genera rivalidad. Una hogaza de pan es un bien privado, su dueño puede excluir a otros de disfrutar de ella y una vez que se consume, nadie más lo puede hacer de nuevo. Un bien que no es excluible pero que sí genera rivalidad es un bien común. Los peces en aguas internacionales son ejemplos típicos de bienes comunes. Nadie puede excluir a otro de pescar, pero una vez consumido, nadie puede pescar de nuevo el mismo pez. El ejemplo del pastizal abierto para todos en la tragedia de los comunes es otro ejemplo claro. Es un bien no excluible, es abierto a todos, pero hay lugar a rivalidad.

Es poco probable que las leyes del mercado conduzcan a la cantidad óptima de cualquier bien público. En general hay tendencia a la sub-producción, por el problema de los polizones o colados, consumidores que disfrutan el bien y no pagan por él. Algunos teóricos abogan, como manera de solucionar el problema, por la intervención del gobierno y el suministro a cargo del estado de los bienes públicos. Sin embargo, en la práctica el problema de calcular cuál es el suministro óptimo (problema de la información) y el problema de los incentivos (hacer que alguien tenga interés de proporcionar exactamente esa cantidad) son problemas abiertos, sin solución conocida, incluso cuando se acepta la intervención del gobierno.

El problema del polizón, o el colado, se refiere a una falla del mercado para producir resultados eficientes. Las externalidades positivas asociadas a la producción de bienes públicos que no son remuneradas y por tanto no hay incentivos suficientes para que voluntariamente se provean. Los consumidores tienen un comportamiento normal de individuos que buscan su interés particular y no tienen ningún reato en disfrutar de las externalidades sin contribuir a su producción.

El caso de la seguridad nacional es típico. Los beneficios que un individuo obtiene por algún esfuerzo que haga para contribuir a la producción de ese bien público son muy bajos, por que están diluidos entre toda la población. Por otro lado los costos pueden ser muy altos, puede sufrir heridas y hasta perder la vida. Desde su punto de vista privado la tendencia normal es a la del polizón, a disfrutar del bien público sin pagar por él. Sabe que aunque no contribuya, no lo pueden excluir de disfrutar de él. También está el caso de los inventores, un nuevo invento puede ser de beneficio para toda la sociedad, pero difícilmente alguien paga por él si lo puede conseguir gratis. A continuación se hace una breve discusión de algunas de las soluciones que se han ensayado o propuesto para el problema del polizón, con diverso grado de éxito.

El estudio del comportamiento colectivo muestra que cuando un individuo se beneficia más de lo que le cuesta, es probable que tome la decisión de producir bienes públicos, independientemente de las externalidades. Esta posibilidad incluye casos de motivación intrínseca, y complementariedad con otros productos. Un grupo de personas que cumple esta misión se denomina un grupo privilegiado. Un ejemplo es el de un comerciante que ilumina la calle frente a su negocio, aunque esto beneficie a otros, simplemente porque recibe suficiente beneficio por lo nuevos clientes. La existencia de grupos privilegiados no es solución total, es posible que subsista el déficit de bienes públicos.

Algunas veces la producción de bienes públicos se hace posible mediante contratos de promotores en los cuales un grupo de personas se compromete a aportar a un contrato para desarrollar un bien público, con la condición de que se alcance un quorum predefinido, o de lo contrario se retorna el aporte. O la variante de las promesas dominante de promotores en la cual un empresario desarrolla la promesa y jura devolver no solo los aportes sino una suma adicional si no se consigue el quorum.

El economista Coasian estudió el problema y encontró condiciones para que posibles beneficiarios de un bien público se asocien y contribuyan de acuerdo a su disposición a pagar a la producción del bien. El resultado teórico de Coasian es que si los costos de transacción son lo suficientemente bajos (es fácil que los beneficiarios se encuentren y se pongan de acuerdo y haya mecanismos accesibles para que las reglas se respeten) se producirá un suministro adecuado, incluso bajo las reglas del mercado. De alguna manera la formación de gobiernos, asociaciones de propietarios y otras organizaciones semejantes pueden ser consideradas como aplicaciones de la solución de Coasian.

La provisión voluntaria es una posibilidad. Si no funciona, el gobierno puede hacerla obligatoria: impuestos y contribuciones que financien los bienes públicos. El problema es cuánto asignar a los diferentes bienes públicos y cómo distribuir el costo entre las personas. A veces funciona la imposición sin fondos, por ejemplo si se obliga a disponer de un extintor de incendios en cada

vehículo, o de un dispositivo para reducir la emisión de gases. La competencia y el mercado se encarga de definir los precios y demás detalles. Otra opción es que el gobierno puede subsidiar la producción de los bienes públicos. De esta manera hay lugar a que el mercado competitivo contribuya a buscar la eficiencia. Sin embargo la corrupción es un riesgo.

Otra solución es la legislación excluyente. Es decir la adopción de derechos de propiedad intelectual o patentes que buscan remover la naturaleza pública del bien, al hacerlo excluyente, prohibiendo su reproducción. El problema con esta solución es que conduce al monopolio, que se sabe trae ineficiencia de otro tipo. Los ejemplos de las compañías farmacéuticas y de software son caso elocuentes de la transformación de esos derechos en rentas monopólicas. Otra fuente de desacuerdo con esta solución es el contraste entre el costo marginal de proporcionar el bien a otra persona adicional, que es casi cero, y la imposibilidad de acceso a los productos por los más necesitados, en el caso de la industria farmacéutica esto es dramático. El economista Joseph Schumpeter argumentó que el exceso de utilidades generado por las leyes de propiedad intelectual debe generar competencia, que finalmente eliminará el monopolio. Esta alternativa se conoce como la destrucción creativa de Schumpeter.

La promoción del altruismo podría ser una solución en ciertos casos, es decir si un número suficiente de personas no piensa y actúa como polizones. Campañas de esta naturaleza han funcionado para el mantenimiento de parques o playas. El ejemplo puede conquistar a otros y eventualmente producir incluso alguna presión sobre los polizones, presión social, que puede ser efectiva si están en minoría. En la misma canasta caben la promoción del espíritu público por las religiones, el nacionalismo, el patriotismo o cualquier otra manera de disminuir el individualismo.

Los bienes públicos no siempre son reconocidos por todos como benéficos, lo que da lugar a críticas por el uso de los recursos públicos para su producción. Estos casos pueden abarcar desde asuntos relativamente neutros como el patrocinio de la cultura o el deporte, hasta asuntos más controvertibles como la misma seguridad nacional, o la prohibición de las drogas. Esto se sale un poco del ámbito económico y entra al político.

En el mismo terreno se critica la posición que defiende el papel del estado en la provisión de bienes públicos por su ineficiencia y el riesgo de corrupción (sólo debe proveer bienes públicos, en la cantidad óptima para la sociedad). En alguna medida, la discusión entre escuelas políticas finalmente recae en diferentes posiciones frente a estos asuntos.

La teoría de la evolución de la cooperación, iniciada por Axelrod [1981], merece mención en relación con estos asuntos. Se ha encontrado que hay condiciones en las cuales personas naturalmente individualistas pueden desarrollar comportamiento cooperativo. La situación más simple es el famoso juego del dilema del

prisionero en el cual en el corto plazo hay una tendencia a reforzar el individualismo. Sin embargo, en el largo plazo, en una secuencia de juegos repetidos, puede desarrollarse el aprendizaje de un comportamiento cooperativo, que se refuerza con recompensas y que también da lugar a retaliaciones cuando el otro no corresponde.

A.6. Decálogo de la Filosofía Liberal

El 1 de abril de 1954 se publicó en las páginas de News Chronicle el siguiente texto firmado por Bertrand Russell:

Tal vez la esencia del enfoque filosófico liberal de la vida podría resumirse en un nuevo decálogo, cuyo objetivo no es sustituir al antiguo, sino complementarlo. Los Diez Mandamientos que, como profesor, yo desearía promulgar son los siguientes:

1. No hay certeza absoluta de nada.
2. No ocultes evidencia, con seguridad saldrá a la luz.
3. Nunca desaconsejes la reflexión, pues sin duda tendrás éxito.
4. Cuando encuentres oposición, aunque sea por parte de tu cónyuge o de tus hijos, intenta vencerla mediante argumentos y no por autoridad, pues una victoria basada en la autoridad es vana e ilusoria.
5. No respetes la autoridad, siempre habrá otra autoridad opuesta.
6. No utilices el poder para suprimir opiniones que consideres perniciosas, pues, si lo haces, las opiniones te suprimirán a ti.
7. No temas defender una opinión excéntrica, pues todas las opiniones aceptadas hoy fueron excéntricas en su día.
8. Encuentra mayor satisfacción en el desacuerdo inteligente que en el acuerdo pasivo, pues, si valoras la inteligencia como se debe, la primera postura representa mayor acuerdo que la segunda.
9. La verdad por encima de todo, aunque sea inconveniente, pues más inconveniente aún sería intentar ocultarla.
10. No envidies la felicidad de los tontos, pues sólo un tonto pensará que eso es felicidad.

BIBLIOGRAFÍA

- J. Alcock. Positive feedback and system resilience from graphical and finite-difference models: The Amazon ecosystem—an example. *Earth Interactions*, 7:5.1–5.23, 2003.
- D. Archer. Biological fluxes in the ocean and atmospheric pCO₂. In H. Elderfield, editor, *Treatise on Geochemistry, Volume 6, The Oceans and Marine Geochemistry*, pages 275–291. Elsevier Ltd., 2003.
- D. Archer, A. Winguth, D. Lea, and N. Mahowald. What caused the glacial/interglacial atmospheric pCO₂ cycles? *Rev. Geophys.*, 38(2):159–190, 2000.
- K. Arrow, B. Bolin, R. Costanza, P. Dasgupta, C. Folke, and C. S. a. Holling. Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Ecological Economics*, 15(2):91–95, 1995. available at <http://ideas.repec.org/a/eee/ecolec/v15y1995i2p91-95.html>.
- R. Axelrod. The evolution of cooperation. *Science*, 211:1390–1396, 1981.
- G. S. Becker. *Human Capital*. The University of Chicago Press, third edition, 1993.
- J. Bjerknes. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, (97):163–172, 1969.
- A. L. Bloom. *Geomorphology, A systematic analysis of late Cenozoic landforms*. Prentice Hall, 1998.
- B. R. Bloom. Public health in transition. *Scientific American*, 293(3):70–77, 2005.
- W. S. Broecker. The ocean. 249(9):146–160, Sept. 1983.
- W. S. Broecker. Chaotic climate. *Sci. Amer.*, 273(5):44–50, Nov. 1995. ISSN 0036-8733.
- L. R. Brown. *Eco-Economy, Building an Economy for the Earth*. Earth Policy

- Institute, W. W. Norton & Company. New York, 2001.
- L. R. Brown. *Plan B: Rescuing a Planet under Stress & a Civilization in Trouble*. Earth Policy Institute, W. W. Norton & Company. New York, 2003.
- L. R. Brown. *Plan B 2.0 : Rescuing a Planet under Stress & a Civilization in Trouble*. Earth Policy Institute, W. W. Norton & Company. New York, 2006.
- K. L. Brubaker, D. Entekhabi, and P. S. Eagleson. Estimation of precipitation recycling. *J. Climate*, 6:1077–1089, 1993.
- M. I. Budyko. The effects of solar radiation on the climate of the Earth. *Tellus*, (21):611–619, 1969.
- M. I. Budyko. *Climate and Life*. Academic Press, New York, 1974.
- J. D. Burchfield. *Lord Kelvin and the Age of the Earth*. The University of Chicago Press, 1990.
- C. Carlson, N. Bates, D. Hansell, and D. Steinberg. Carbon cycle. In J. Steele, S. Thorpe, and K. Turekian, editors, *Encyclopedia of Ocean Sciences*, pages 390–400. Academic Press, 2001.
- Chao. Concrete testimony to shifting latitude of the tropics. *EOS*, page 433, October 1996.
- M. Claussen, L. Mysak, A. Weaver, M. Crucifix, T. Fichefet, M. F. Loutre, S. Weber, J. Alcamo, V. Alexeev, A. Berger, R. Calov, A. Ganopolski, H. Goosse, G. Lohmann, F. Lunkeit, I. Mokhov, V. Petoukhov, P. Stone, and Z. Wang. Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models. *Climate Dynamics*, 18(7): 579–586, 2002.
- J. L. Cohen. Human population grows up. *Scientific American*, 293(3):26–33, 2005.
- A. Cortina. *La ética de la sociedad civil*. Anaya, 1995.
- W. J. Cosgrove and F. R. Rijsberman. *World Water Vision, Making Water Everybody's Business*. World Water Council, Earthscan Publications Ltd, London, 2000.
- G. W. Crabtree, M. S. Dresselhaus, and M. V. Buchanan. The hydrogen economy. *Physics Today*, 57(12):39–44, 2004.
- U. Cubasch, G. Meehl, G. Boer, R. Stouffer, M. Dix, A. Noda, C. Senior, S. Raper, and K. Yap. Projections of future climate change. In J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, editors, *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- A. Dai, F. Giorgi, and K. E. Trenberth. Observed and model simulated precipitation diurnal cycles over the contiguous United States. *J. Geophys. Res.*,

- (104):6377–6402, 1999.
- H. E. Daly. Economics in a full world. *Scientific American*, 293(3):65, 2005.
- H. E. Daly and J. Farley. *Ecological Economics: Principles and Applications*. Island Press, 2004.
- P. Dasgupta. *Human-well Being and the Natural Environment*. Oxford University Press, 2001.
- A. de Saint-Exupéry. *Wind, Sand and Stars*. Harcourt, 1940.
- K. S. Deffeyes. *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage*. Princeton University Press, 2001.
- H. Diaz and V. Markgraff. *El Niño. Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press, 1993.
- R. E. Dickinson. Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, (56):1240–48, 1975.
- J. P. Dupuy and A. Grinbaum. Living with uncertainty: From the precautionary principle to the methodology of ongoing normative assessment. *IPCC Workshop on Describing Scientific Uncertainties in Climate Change to Support Analysis of Risk and of Options*, IPCC Workshop on Describing Scientific Uncertainties in Climate Change to Support Analysis of Risk and of Options:63–64, 2004.
- EarthPolicyInstitute, 2006. URL <http://www.earth-policy.org>. [Online; accessed 2-March-2006].
- E. A. B. Eltahir and R. L. Bras. Precipitation recycling. *Rev. Geophys.*, 34: 367–378, 1996.
- K. Emanuel. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436:686–688, 2005.
- EPA. *Characterization of Municipal Solid Waste in the United States: 1998 Update*. U.S. Environmental Protection Agency, 1998.
- M. G. Evandri, P. Tucci, and P. Bolle. Toxicological evaluation of commercial mineral water bottled in polyethylene terephthalate: a cytogenetic approach with *Allium cepa*. *Food Additives and Contaminants*, 17:1037–1045, 2000.
- J. T. Evans. *Crop Evolution Adaptation and Yield*. Cambridge University Press, 1993.
- FAO. *The State of Food and Agriculture: 1995*. Food and Agriculture Organization, Rome, 1995.
- FAO. *Forest Resources Assessment, 2000*. Roma, 2001.
- C. Folland, T. Karl, J. Christy, R. Clarke, G. Gruza, J. Jouzel, M. Mann, J. Oerlemans, M. Salinger, and S.-W. Wang. Observed climate variability and change. In J. T. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, editors, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge

- University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- Fonade. *Estudio Nacional de Aguas*. Departamento Nacional de Planeación, Mejía Millan y Perry LTDA, 1985.
- Fonade. *Estudio Nacional de Energía*. Departamento Nacional de Planeación, Mejía Millan y Perry LTDA, 1982.
- L. A. Frank and J. B. Sigwarth. Atmospheric holes and small comets. *Reviews of Geophysics*, 31(1):1–28, 1993.
- R. A. Frosch. Industrial ecology: minimizing the impact of industrial waste. *Physics Today*, 47(11):63–68, 1994.
- N. Georgescu-Roegen. *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard U. Press, Cambridge, MA, 1971.
- W. W. Gibbs. How should we set priorities. *Scientific American*, 293(3):86–93, 2005.
- M. Glantz, R. Katz, and N. Nicholls. *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies*. Cambridge University Press, 1991.
- P. H. Gleick. Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs. 21(2):83–92, 1996.
- P. H. Gleick, editor. *The WORLD'S WATER 2004-2005 The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, 2005.
- P. H. Gleick, G. Wolff, E. L. Chalecki, and R. Reyes. *The New Economy of Water: The Risks and Benefits of Globalization and Privatization of Fresh Water*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, 2002.
- G. Hardin. The tragedy of commons. *Science*, 162:1243–1248, 1968.
- J. Harte. *Consider a Spherical Cow, A course in Environmental Problem Solving*. University Science Books, Sausalito, California, 1988.
- J. Harte. Toward a synthesis of the newtonian and darwinian worldviews. *Physics Today*, 55:29, 2002.
- D. L. Hartmann. *Global Physical Climatology*, volume 56 of *International Geophysics Series*. Academic Press, 1994.
- S. Hastenrath. *Tropical Meteorology*. Springer, 1991.
- I. M. Held. Climate models and the astronomical theory of ice ages. *Icarus*, (50):449–461, 1982.
- L. Heng. 20 natural lakes disappear each year in China. *People's Daily*, Oct. (21), 2002.
- M. T. Hobbins, J. A. Ramírez, and T. C. Brown. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary? *Geophys. Res. Lett.*, 31(13):1–5, 2004.
- J. R. Holton. *An Introduction to Dynamic Meteorology*, volume 48 of *International Geophysics Series*. Academic Press, 3 edition, 1992.
- W. Hongchang. *Deforestation and Desiccation in China: A Preliminary Study*.

- Center for Environment and Development, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing, China, 1999.
- F. Hoyos-Patiño. Glaciers of Colombia. In J. R. S. Williams and J. G. Ferrigno, editors, *Glaciers of South America*, Satellite Image Atlas of Glaciers of the World, pages I11–I30. U.S. Geological Survey Professional Paper P1386–I, 1998.
- G. Hoyos-Vásquez. Ética comunicativa y educación para la democracia. *Revista Iberoamericana de educación*, (7):65–91, 1995.
- D. V. Hoyt and K. H. Schatten. How well was the Maunder minimum observed? *Solar Physics*, (165):181–192, 1996.
- IEA. *World Energy Outlook 2004*. Paris: OECD, 2004.
- IEA. *Renewables for Power Generation, Status & Prospects*. Paris: OECD, 2003.
- IPCC. Climate change 2001. In J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, editors, *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001a.
- IPCC. Report of working group i. In J. Houghton, G. Jenkins, and J. Ephraums, editors, *Scientific Assessment of Climate change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 1990.
- IPCC. Summary for policymakers. In J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, editors, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001b.
- ISA. *Estudio del Sector de Energía Eléctrica*. Interconecion Electrica S. A., Colombia, 1980.
- IUCN. *Red List of Threatened Species*. Species Survival Commission, World Conservation Union-IUCN, Gland, Switzerland, and Cambridge, U.K., 2004.
- S. Kalmanovitz. Las instituciones, la ley y el desarrollo económico en Colombia, 2006. URL <http://www.iigov.org/papers/tema4/paper0039.htm>. Instituto Internacional de Gobernabilidad. Proyecto LAGNIKS Gobierno Autónomo Catalán, [Online; accessed 2-March-2006].
- P. M. Kelly and T. M. L. Wigley. Solar cycle length, greenhouse forcing and global climate. *Nature*, (360):328–330, 1992.
- J. W. Kirchner. The gaia hypothesis: Are they testable? are they useful? In S. Schneider and B. P. J., editors, *Scientists on GAIA*, pages 38–46. MIT Press, 1991.
- J. R. Knight, R. J. Allan, C. K. Folland, M. Vellinga, and M. E. Mann. A

- signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophys. Res. Lett.*, 32:L20708, 2005. doi: 10.1029/2005GL024233.
- K. Y. Kondratyev and I. Galindo. *Volcanic Activity and Climate*. Deepak, 1977.
- K. Labitzke and H. V. Loon. Association between the 11-year solar cycle and the atmosphere. part v: Summer. *J. Climate*, (5):240–251, 1992.
- H. Lamb. Volcanic dust in the atmosphere, with a cronology and assesment of its meteorological significance. *Phylos. Trans. Royal Soc. London, Ser. A.*, (266):425–533, 1970.
- J. Lean. Living with a variable Sun. *Physics Today*, 58(6):32–38, 2005.
- LEED. *Green Building Rating System For New Construction & Major Renovations*. U. S. Green Building Council, 2.1 edition, 2002.
- A. Leopold. *A Sand County Almanac, and Sketches Here and There*. Oxford University Press, New York, 1948.
- B. Lomborg, editor. *Global Crises, Global Solutions: Copenhagen Consensus, 2004*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2006.
- J. Lovelock. *Gaia, a new look at life on Earth*. Oxford University Press, 1979.
- A. B. Lovins. More profit with less carbon. *Scientific American*, 293(3):52–61, 2005.
- M. Mann, R. Bradley, and M. Hughes. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res. Lett.*, 266:759–762, 1999.
- L. Margulis and J. Lovelock. Is Mars a spaceship, too? *Natural History*, (June/July):86–90, 1976.
- V. Marov. *Planetas*. Ed. Mir, 1985.
- B. McAvaney, C. Covey, S. Joussaume, V. Kattsov, A. Kitoh, W. Ogana, A. Pitman, A. Weaver, R. Wood, and Z.-C. Zhao. Model evaluation. In J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, editors, *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- MEN-Colombia. *La Revolución Educativa*. Ministerio de Educación Nacional, Bogotá, Colombia, 2002.
- O. J. Mesa. Enso, rotación terrestre, volcanes y sismicidad. *DYNA*, (136): 41–61, 2002.
- O. J. Mesa, G. Poveda, and L. F. Carvajal. *Introducción al Clima de Colombia*. Imprenta Universidad Nacional de Colombia, 1997.
- P. C. D. Milly and K. A. Dunne. Trends in evaporation and surface cooling in the Mississippi River basin. *Geophys. Res. Lett.*, 28(7):1219 – 1222, 2001.

- A. S. Monin. Role of oceans in climate models. In *Physical Basis of Climate and Climate Modelling*, GARP Publications Series, pages 201–205. World Meteorol. Organiz., 1975.
- A. Montenegro and R. Rivas. *Las piezas del rompecabezas, desigualdad, pobreza y crecimiento*. Taurus Alfaguara, 2005.
- R. A. Myers and B. Worm. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature*, 432:280, 2003.
- J. D. Neelin, D. S. Battisti, A. C. Hirst, F. F. Jin, Y. Wakata, T. Yamagata, and S. E. Zebiak. ENSO theory. *J. Geophys. Res.*, 103(C7):14,261–14,290, 1998.
- R. Nemani, M. White, P. Thornton, K. Nishida, S. Reddy, J. Jenkins, and S. Running. Recent trends in hydrologic balance have enhanced the terrestrial carbon sink in the United States. *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), 2002.
- D. Nepstad. Governing the world's forests. In B. Babbitt and J. Sarukhán, editors, *Conserving Biodiversity, Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*, pages I11–I30. Aspen Institute, 2005.
- D. Nepstad, D. McGrath, A. C. Barros, A. Alencar, M. Santilli, and M. C. Vera. Frontier governance in Amazonia. *Science*, 295:629–631, 2002.
- D. Pauly and R. Watson. Counting the last fish. *Scientific American*, 289(1):35, 2003.
- J. P. Peixóto and A. H. Oort. *Physics of Climate*. American Institute of Physics, 1992.
- C. Penland. A stochastic approach to nonlinear dynamics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(7):921–925, 2003.
- G. Poveda and O. J. Mesa. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic-atmospheric phenomena. *J. of Climate*, 10(10):2690–2702, 1997.
- G. Poveda and O. J. Mesa. Efectos hidrológicos de la deforestación. *Energética*, 16:91–102, 1995.
- G. Poveda and O. J. Mesa. La oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la hidroclimatología de Colombia. *Memorias XVII Seminario Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR*, (2):343–354, 1996.
- I. Prentice, G. Farquar, M. Fasham, M. Goulden, M. Heimann, V. Jaramillo, H. Kheshgi, C. L. Quéré, R. Scholes, and D. Wallace. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In J. T. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, editors, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- S. Rahmstorf. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years.

- Nature*, 419:207–214, September 2002.
- F. Rijsberman. Sanitation and water. In B. Lomborg, editor, *Global Crises, Global Solutions: Copenhagen Consensus, 2004*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2006.
- A. Robinson and H. Stommel. The oceanic thermocline and the associated thermohaline circulation. *Tellus*, 11(3):295–308, 1959.
- A. Robock. Volcanic eruptions and climate. *Rev. Geophys.*, (38):191–219, 2000.
- D. H. Roemmich and C. Wunsch. Two transatlantic sections: Meridional circulation and heat flux in the subtropical North Atlantic Ocean. *Deep Sea Research*, (32):619–664, 1985.
- J. D. Sachs. Can extreme poverty be eliminated? *Scientific American*, 293(3):34–43, 2005.
- E. Salati and P. B. Vose. Amazon basin: A system in equilibrium. *Science*, 225:129, 1984.
- F. Savater. *Ética para Amador*. Ariel, 1991.
- T. Schilling. Greenhouse effect. In D. R. Henderson, editor, *The Fortune Encyclopedia of Economics*, pages 447–452. Warner Books, 1993.
- M. E. Schlesinger and N. Ramankutty. Implications for global warming of intercycle solar irradiance variations. *Nature*, pages 330–333, 360 1992.
- A. Sen. *Desarrollo como Libertad*. Editorial Planeta, Barcelona, 2000.
- H. Shapouri, J. A. Duffield, and M. Wang. *The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Economic Report No. 813, 2002.
- J. Shukla, C. A. Nobre, and P. Sellers. Amazon deforestation and climate change. *Science*, 247:1322–1325, 1990.
- W. J. Shuttleworth. Evaporation from Amazonian rainforest. *Philos. Trans. R. Soc. London, B*, 233:321–346, 1988.
- T. R. Sinclair, L. C. Purcell, and C. Sneller. Crop transformation and the challenge to increase yield potential. *Trends Plant Sci.*, 9(2):70–75, September 2002.
- N. Sizer and D. Plouvier. *Increased Investment and Trade by Transnational Logging Companies in Africa, the Caribbean, and the Pacific*. Belgium: World Wide Fund for Nature (WWF) and WRI Forest Frontiers Initiative, 2000.
- R. Smith, O. J. Mesa, I. Dyrner, P. Jaramillo, G. Poveda, and D. Valencia. *Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre*. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, 2 edition, 2000.
- S. Solomon. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Rev. Geophys.*, (37):275–316, 1999.
- F. D. Stacey. *Physics of the Earth*. John Wiley & Sons, 1977.

- T. Standage. Bad to the last drop. *New York Times*, 01082005, 2005.
- T. F. Stocker, G. K. C. Clarke, H. L. Treut, R. S. Lindzen, V. P. Meleshko, R. K. Mugara, T. N. Palmer, R. T. Pierrehumbert, P. J. Sellers, K. E. Trenberth, and J. Willebrand. Physical climate processes and feedbacks. In J. T. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, editors, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- T. Takahashi. Carbon dioxide (CO₂) cycle. In J. Steele, S. Thorpe, and K. Turekian, editors, *Encyclopedia of Ocean Sciences*, pages 400–407. Academic Press, 2001.
- D. J. Thomson. The seasons, global temperature, and precession. *Science*, (268):59–68, April 1995.
- B. A. Tinsley. Solar wind modulation of the global electric circuit and apparent effects on cloud microphysics, latent heat release, and tropospheric dynamics. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 48:165–175, 1996.
- K. E. Trenberth. Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation. *J. Climate*, 12:1368–1381, 1999.
- UN. *United Nations World Population Prospects: The 2004 Revision*. UN Publications, New York, 2005.
- UnitedNations. *Framework Convention on Climate Change 1997 in Kyoto, Japan*. Third Session of the Conference of the Parties (COP) to the United Nations, Kyoto, Japan, 1997.
- UPME. *Plan Energético Nacional: Estrategia Energética Integral, Visión 2003 – 2020*. Unidad de Planeación Minero–Energética, Colombia, 2003.
- USCBO. *The Economics of Climate Change*. United States Congressional Budget Office, Washington, 2003.
- USGS. *Mining the Earth*. U.S. Geological Survey, Washington, DC, 1992.
- T. Volk. Rise of angiosperms as a factor in longterm climatic cooling. *Geology*, 17:107–110, 1989.
- H. Volland. *Atmospheric Tidal and Planetary Waves*, volume 12 of *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*. Springer, 1988.
- M. Vuille, R. S. Bradley, M. Werner, R. Healy, and F. Keimig. Modeling $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the tropical Americas. part i: Interannual variability and climatic controls. *J. Geophys. Res.*, 108(7), 2003.
- J. M. Wallace and P. V. Hobbs. *Atmospheric Science, an introductory survey*. Academic Press, 1977.
- WCFSD. *Our Forests, Our Future*. World Commission on Forests and Sustainable Development, Winnipeg, Canada, 1999.
- P. Webster, G. Holland, J. Curry, and H. Chang. Changes in tropical cyclone

- number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309: 1844–1846, September 2005.
- P. B. Weisz. Basic choices and constraints on long-term energy supplies. *Physics Today*, 57(7):47–52, 2004.
- H. G. Wells. *The Outline of History: Being a Plain History of Life and Mankind*. The Macmillan Company, 1920.
- Wikipedia. Externality — wikipedia, the free encyclopedia, 2006. URL <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Externality&oldid=-41156174>. [Online; accessed 2-March-2006].
- Y. Youlin, V. Squires, and L. Qi, editors. *Global Alarm: Dust and Sandstorms from the World's Drylands*. Secretariat of the U.N. Convention to Combat Desertification, Bangkok, 2002.
- Y. Zhang, J. Wallace, and D. Battisti. Enso-like interdecadal variability. *J. Climate*, 10:1004–1020, 1997.

ÍNDICE ALFABÉTICO

- África, 168
Alcock [2003], 194, 309
Archer et al. [2000], 105, 117, 309
Archer [2003], 117, 309
Arrow et al. [1995], 237, 309
Axelrod [1981], 306, 309
Becker [1993], 230, 309
Bjerknes [1969], 64, 309
Bloom [1998], 19, 309
Bloom [2005], 209, 233–236, 309
Broecker [1983], 117, 120, 309
Broecker [1995], 60, 309
Brown [2001], 182, 199–202, 209, 309
Brown [2003], 2, 161, 181, 209, 310
Brown [2006], 180, 183, 209, 237, 238, 241, 310
Brubaker et al. [1993], 191, 310
Budyko [1969], 58, 310
Budyko [1974], 191, 310
Burchfield [1990], 20, 310
Carlson et al. [2001], 117, 310
Chao [1996], 75, 310
Claussen et al. [2002], 112, 310
Cohen [2005], 209, 210, 310
Cortina [1995], 227, 228, 310
Cosgrove and Rijsberman [2000], 157, 162, 176, 177, 310
Crabtree et al. [2004], 128, 310
Cubasch et al. [2001], 106, 109–111, 310
Dai et al. [1999], 114, 310
Daly and Farley [2004], 237, 311
Daly [2005], 209, 237, 311
Dasgupta [2001], 209, 237, 311
Deffeyes [2001], 129, 311
Diaz and Markgraff [1993], 67, 311
Dickinson [1975], 8, 311
Dupuy and Grinbaum [2004], 111, 311
EPA [1998], 200, 311
EarthPolicyInstitute [2006], 163, 311
Eltahir and Bras [1996], 191, 311
Emanuel [2005], 100, 101, 111, 311
Evandri et al. [2000], 164, 311
Evans [1993], 180, 311
FAO [1995], 182, 311
FAO [2001], 189, 311
Folland et al. [2001], 83–98, 100, 102, 103, 105, 311
Fonade [1982], 156, 312
Fonade [1985], 176, 312
Frank and Sigwarth [1993], 12, 312
Frosch [1994], 199, 312
Georgescu-Roegen [1971], 127, 237, 243, 312
Gibbs [2005], 209, 237, 312
Glantz et al. [1991], 67, 312

- Gleick et al. [2002], 157, 173, 312
 Gleick [1996], 167, 312
 Gleick [2005], 157, 312
 Hardin [1968], 216, 226, 312
 Harte [1988], 312
 Harte [2002], 114–116, 312
 Hartmann [1994], 7, 24, 28, 29, 55–57, 59, 312
 Hastenrath [1991], 67, 312
 Held [1982], 75, 312
 Heng [2002], 160, 312
 Hobbins et al. [2004], 99, 312
 Holton [1992], 37, 312
 Hongchang [1999], 184, 312
 Hoyos-Patiño [1998], 79, 313
 Hoyos-Vásquez [1995], 228, 313
 Hoyt and Schatten [1996], 7, 313
 IEA [2003], 140, 313
 IEA [2004], 128–142, 313
 IPCC [1990], 107, 313
 IPCC [2001a], 77, 80, 81, 313
 IPCC [2001b], 77, 313
 IUCN [2004], 196, 313
 ISA [1980], 148, 313
 Kalmanovitz [2006], 227, 313
 Kelly and Wigley [1992], 8, 313
 Kirchner [1991], 21, 313
 Knight et al. [2005], 70, 313
 Kondratyev and Galindo [1977], 70, 314
 LEED [2002], 203, 314
 Labitzke and Loon [1992], 9, 314
 Lamb [1970], 70, 71, 314
 Lean [2005], 9, 314
 Leopold [1948], 115, 314
 Lomborg [2006], 242, 314
 Lovelock [1979], 18–20, 314
 Lovins [2005], 128, 144, 314
 MEN-Colombia [2002], 229, 314
 Mann et al. [1999], 91, 314
 Margulis and Lovelock [1976], 18, 19, 314
 Marov [1985], 6, 314
 McAvaney et al. [2001], 113, 114, 314
 Mesa et al. [1997], 75, 83, 100, 314
 Mesa [2002], 36, 314
 Milly and Dunne [2001], 99, 314
 Monin [1975], 33, 314
 Montenegro and Rivas [2005], 176, 209, 230, 232, 242, 243, 315
 Myers and Worm [2003], 197, 315
 Neelin et al. [1998], 67, 315
 Nemani et al. [2002], 123, 315
 Nepstad et al. [2002], 184–187, 315
 Nepstad [2005], 194, 315
 Pauly and Watson [2003], 197, 315
 Peixóto and Oort [1992], 31, 315
 Penland [2003], 115, 315
 Poveda and Mesa [1995], 189, 193, 315
 Poveda and Mesa [1996], 69, 315
 Poveda and Mesa [1997], 68, 315
 Prentice et al. [2001], 117, 315
 Rahmstorf [2002], 50, 51, 315
 Rijsberman [2006], 157, 158, 316
 Robinson and Stommel [1959], 51, 316
 Robock [2000], 70, 71, 316
 Roemmich and Wunsch [1985], 51, 316
 Sachs [2005], 209, 219, 316
 Salati and Vose [1984], 189, 316
 Savater [1991], 228, 316
 Schilling [1993], 76, 108, 316
 Schlesinger and Ramankutty [1992], 8, 316
 Sen [2000], 209, 210, 213–215, 221–224, 229, 230, 316
 Shapouri et al. [2002], 151, 316
 Shukla et al. [1990], 193, 316
 Shuttleworth [1988], 191, 316
 Sinclair et al. [2002], 180, 316
 Sizer and Plouvier [2000], 189, 316
 Smith et al. [2000], 111, 316
 Solomon [1999], 71, 316

- Stacey [1977], 36, 316
 Standage [2005], 164, 316
 Stocker et al. [2001], 55, 57, 60, 317
 Takahashi [2001], 117, 317
 Thomson [1995], 8, 75, 317
 Tinsley [1996], 9, 317
 Trenberth [1999], 107, 191, 317
 UN [2005], 210, 317
 UPME [2003], 156, 317
 USCBO [2003], 238, 317
 USGS [1992], 201, 317
 UnitedNations [1997], 77, 81, 317
 Volk [1989], 19, 317
 Volland [1988], 9, 317
 Vuille et al. [2003], 191, 317
 WCFSD [1999], 194, 317
 Wallace and Hobbs [1977], 33, 317
 Webster et al. [2005], 100, 317
 Weisz [2004], 128, 318
 Wells [1920], 128, 318
 Wikipedia [2006], 299, 302, 303, 318
 Youlin et al. [2002], 184, 318
 Zhang et al. [1997], 69, 318
 de Saint-Exupéry [1940], 115, 311
- año
 anomalístico, 75
 tropical, 75
- ablación, 15
 aborto, 216
 aceleración convectiva, 35
 Adam Smith, 224, 257, 287
 aerosoles, 10, 11, 17, 20, 22, 26, 27,
 68, 71, 77, 78, 80, 81, 83, 106
 África, 44, 45, 50, 53, 61, 63, 64, 68,
 78, 97, 102, 104, 113, 137, 160,
 162, 182–185, 189, 196, 218,
 220, 234, 238, 253, 254
 África sub-sahariana, 218
 agricultura, 180, 181, 220
 agua, 9, 11–14, 17, 159, 204
 acceso, 158, 198, 217, 219, 221,
 251
 agotamiento, 158, 160, 161
 agricultura, 158, 182
 almacenamiento, 177, 268
 ambiente, 159, 168
 aumento del uso, 158, 160, 162
 azul, 159
 balance, 13, 17, 18, 189, 190
 bien común, 290
 bosques, 192
 calidad, 165, 169, 170, 184, 199,
 202, 204, 259, 290
 cambio climático, 82, 96, 106, 110,
 111, 164
 clima, 6, 13–17, 46
 CO₂, 120, 122, 124
 consumo básico, 158, 174
 derecho, 166
 economía, 175, 237
 efecto invernadero, 11, 25
 en botella, 163, 164
 energía, 147, 148, 152–154
 erosión, 183
 fotosíntesis, 17
 geomorfología, 17
 glaciares, 95
 hielo, 5, 11, 15, 58
 hielos marinos, 15, 16
 instituciones, 170
 medición, 172
 naturaleza, 165
 planeación, 171
 presión de saturación, 15
 química, 17
 recreación, 260, 261, 269, 278
 reutilización, 173
 salinidad, 16
 tecnologías, 167
 transpiración, 119, 125
 uso doméstico, 157

- uso eficiente, 147, 162, 167, 172, 204, 205, 239–241
- uso productivo, 159, 174
- vapor de agua, 5, 11, 25, 56
- variabilidad, 168
- verde, 159
- Agung, 71
- albedo, 11, 29, 31, 58, 75
- albedo de la litosfera, 21
- albedo del océano, 14
- alcantarillado, 157, 159, 164, 174, 177, 212, 221, 259, 263
- Alemania, 163
- alimentos, 179
- América, 102, 218
- América del Norte, 44, 61, 63, 69, 107, 120, 181, 195, 227
- América Latina, 148, 162, 262, 275
- Amazonia, 97, 187, 188
- AMO, 69
- Amu Daria, 160
- Antártica, 33, 50, 54, 61, 62, 64, 92, 95, 102, 104, 105
- Arabia Saudita, 161–163, 181
- Argentina, 181, 230
- Aristóteles, 221
- Asia, 68, 120, 162
- asoleamiento, 73, 147, 206
- Atlántico, 32, 43, 47, 50, 53, 54, 56, 60, 61, 63, 69, 71, 86, 91, 99, 100, 103, 104, 106, 109, 110, 123
- atmósfera, 5, 7, 9–12, 14, 18, 78, 80, 81, 89, 91, 102, 111, 115, 118–122
- aumento nivel del mar, *véase* mar
- aumento precipitación, 78
- Australia, 44, 61, 64, 65, 108, 139
- automóvil, *véase* carro
- azufre, 11, 20, 70, 152, 240
- balance de agua, *véase* agua
- balance de energía, 169
- balance energético, 12, 23, 29
- balance hidrostático, 39
- banda transportadora, *véase* circulación termohalina
- Bangladesh, 212, 218, 219
- basuras, 156, 208
- Beijín, 161
- Bentham, 213, 224
- bien común, 165, 174, 175, 196, 224, 225, 237, 304
- bien público, 165, 237, 300, 304–306
- bien privado, 165
- bio-combustibles, 150
- biodiésel, 152
- biodiversidad, 195
- biosfera, 18, 20, 118, 122
- Bogotá, 198
- Bombay, 198
- bombeo biológico, 123
- bombeo físico de CO₂, 121
- Borneo, 189
- bosques
 - CO₂, 187
- Brasil, 69, 97, 145, 151, 152, 163, 181, 187, 188, 218
- Buenos Aires, 198
- Calcuta, 198
- calentamiento diabático, 33
- calentamiento global, 27, 78, 86–88, 90–92, 98, 101, 104–106, 108, 115
- calidad del agua, *véase* agua
- California, 219
- calor específico del agua, 14
- calor latente, 14, 29, 58
- calor sensible, 29
- cambio climático, 12, 77
- Camerún, 125

- Canadá, 102, 187
 capital humano, 230
 capital natural, 238
 capital social, 227
 carbón, 155
 carbonato cálcico, 121
 carbono, 117
 Caribe, 64
 carro, 145, 235, 272
 catálisis, 153
 celdas de combustible, 4, 152–154
 celdas de Hadley, 40, 42, 44
 celdas fotoeléctricas, 205
 celdas fotovoltaicas, 142, 149
 Chile, 64, 230
 China, 3, 64, 102, 131, 136–138, 160, 161, 163, 180–184, 193, 194, 196, 197, 200, 210, 211, 213–215, 218, 219, 223, 225, 238
 chorro de hielo seco, 125
 chorros subtropicales, 44
 ciclo, 5, 14, 15, 17, 19, 34, 46, 54, 117
 ciclo anual, 30–32
 ciclo diurno, 30
 ciclo hidrológico, 17, 18, 91
 ciclo semianual, 76
 ciclos biogeoquímicos, 17
 ciclos de glaciaciones, 63
 ciclos solares, 9
 circulación, 14, 16, 18, 21, 22, 28, 29, 33, 34, 38, 40, 42
 circulación atmosférica, 33
 circulación de Walker, 64
 circulación general, 33
 Circulación Oceánica, 46
 circulación térmica, 40, 42
 circulación termohalina, 32, 59, 63, 106
 Clausius-Clapeyron, 15, 29, 57
 CO₂, 12, 25, 54, 61, 79–81, 91, 104, 107, 109, 110, 112, 113, 117–125, 127, 129, 131, 134–139, 144, 145, 151, 152, 155
 mercado, 243
 Co-evolución, 21
 coerción mutua, 226
 Colombia, 14, 18, 43, 69, 79, 83, 93, 100, 145, 148–150, 152, 156, 163, 193, 195, 198, 201, 202, 207, 208, 218, 219, 227, 230–232, 235, 242, 243
 combustibles fósiles, 127
 composición de la atmósfera, 10, 18
 concepción circular, 200
 concepción determinista, 115
 concepción lineal, 200
 Condorcet, 213
 confiabilidad del suministro, 155
 Congo, 189
 Consenso de Copenhagen, 242
 constante solar, 7, 29
 construcción, 204
 convección, 12, 21, 22, 28, 36, 39, 45, 50, 54, 57, 71, 104
 convergencia, 35, 39, 40, 42, 45, 65, 70, 107
 cooperación, 306
 corriente
 contracorriente ecuatorial, 53
 de Agulhas, 53
 de Brasil, 53
 de chorro, 39
 de Humboldt, 53
 del golfo, 53
 ecuatoriales, 53
 creacionismo, 19
 Cretáceo, 61
 Cuaternario, 62
 cuenca polvorienta, 184
 curva de aprendizaje, 141
 Dansgaard-Oeschger, 104

- David Ricardo, 224
 deforestación, 81, 184, 191
 degasificación, 12
 Delhi, 198
 demanda por electricidad, 130
 demanda por energía, 132
 democracia, 222, 228
 demodulación compleja, 75
 dendroenergía, 151
 desalinización, 172
 desarrollo, 220, 221
 desarrollo sostenible, 4, 78, 116, 186,
 195, 209, 237, 238, 240, 247,
 250, 252, 254, 255
 desarrollo tecnológico, 141
 descomposición de las rocas, *véase* me-
 teorización
 desechables, 200
 destilación, 151
 detección de cambio climático, 83
 diámetro de la Tierra, 72
 dispersión, 22, 29, 70, 195
 distribución de la precipitación, 45
 disulfuro de carbono, 20
 divergencia, 35, 40
 DMS, 20
- economía de escala, 141
 economía de red, 142, 300
 ecuación de Kepler, 72
 educación, 229
 calidad, 231, 233
 cobertura, 231
 efecto invernadero, 11, *véase* CO₂, 23,
 25, 26, 59
 eficiencia energética, 134, 136, 137, 139,
 144–147, 150, 153, 156, 205,
 240
 Egipto, 160, 218
 eje de rotación, 36
 El Niño, *véase* ENSO
- Emiratos Árabes, 163
 energía, 127–129, 133, 134, 137, 139,
 141, 143, 148
 almacenamiento, 153
 eólica, 149
 efecto invernadero, 132, 155
 eficiencia, 145
 eléctrica, 128, 153
 fuentes renovables, 127
 hidrógeno, 152
 hidro, 148
 mercado, 132, 133, 150, 153
 nuclear, 154
 renovable, 127
 solar, 149
 sustitución, 146
 transporte, 153, 269
 usos finales, 134
 energía interna, 36
 enfasamiento, 75
 enfermedades, 233
 Engels, 221, 223
 ENSO, 64, 105, 110, 168
 Eratóstenes, 71
 erosión, 123, 181, 183
 escala sinóptica, 37
 espectro de radiación, 23
 estado en espera, 145
 estado estacionario, 41
 Estados Unidos, 1, 3, 69, 107, 108,
 138, 139, 144, 145, 148, 151,
 152, 158, 160, 163, 177, 200,
 202, 211, 240, 258, 260, 270,
 271, 274
 estomas, 125
 estratopausa, 13
 estratosfera, 13
 etanol, 152
 Etiopía, 219
 Europa, 61, 63, 86, 102, 120, 139, 181,
 218

- eutroficación, 170
 evaporación, 14, 58
 eventos extremos, 113
 evolución, 19
 excentricidad, 63, 72
 externalidad de red, 142

 Filipinas, 189, 194
 flujo geostrófico, 39
 flujo inercial, 39
 fluorocarbonos, 27, 76
 fotosíntesis, 11, 17, 48, 120, 125, 153
 fricción, 40
 frontera K-T, 62
 fuerza de Coriolis, 36

 Gaia, 18, 21, 226
 ganadería, 182
 Ganges, 160
 gas natural, 129
 gasolina, 152, 155
 glaciaciones, 61
 glaciares, *véase* agua
 globalización, 225
 gobernabilidad, 186
 gradiente pseudo-adiabático, 29
 Groenlandia, 64, 104
 grupos de interés, 239

 Heinrich, 104
 hemisferios, 32
 hidroelectricidad, 143, 147
 hidrosfera, 13
 hidrostática, 28
 hielo, *véase* agua
 hielo seco, 125
 hielo-albedo, 58
 hielos marinos, *véase* agua
 Himalaya, 21
 historia del clima de la Tierra, 60
 Holoceno, 6, 102
 huracanes, 100, 111

 igualdad, 217, 232, 241
 de oportunidades, 221
 impuestos, 238
 incertidumbre, 107
 India, 3, 44, 61, 64, 131, 137, 138, 143,
 160–163, 180, 181, 193, 200,
 211, 214, 215, 218–220, 225,
 238
 indicadores, 223, 242
 Indonesia, 189
 inestabilidad baroclínica, 45
 insolación, 30, 73
 instituciones, 227, 228
 interacción atmósfera–océano, 65
 IPCC, 77, 109
 Irán, 162, 181, 215
 Irak, 160
 Israel, 162, 181
 Italia, 163

 Japón, 196
 Jepirachi, 150

 Kepler, 72
 Kerala, 215
 Kraratoa, 71
 Kuroshio, 53

 Líbano, 163
 lámparas fluorescentes compactas, 146
 lago Agassiz, 63
 Lago Nyos, 125
 ley
 conservación de energía, 34, 36
 conservación de masa, 34
 conservación de momentum, 34
 Henry, 121
 hidrostática, 12
 Stefan-Boltzmann, 23
 Wien, 23
 libertad, 221, 222
 litosfera, 21

- longitud del perihelio, 63
Luna, 74
- Mínimo de Maunder, 8
México, 139, 160, 162, 163, 180, 181, 198, 218, 284
Madagascar, 189
Malasia, 189
Malthus, 213
Manaus, 188
manchas solares, 7
mar, 19
 aumento nivel del mar, 79
 circulación inducida por los vientos, 46
 circulación termohalina, 46, 49, 51
 clima, 46
 de Tétis, 22, 61
 densidad, 46
 giros, 53
 mezclado turbulento, 51
 nivel del, 53
 salinidad, 47
 surgencia, 49, 54, 65, 76
 termoclina, 49, 65
Marx, 221, 223, 224
Medellín, 163, 199
Mekong, 160
membranas, 154
mercado, 203, 224, 225
mercados, 223
metano, 25
meteorización, 17, 19, 118, 123, 183
metilo de yodo, 20
Milankovich, 64, 105
minería, 201
modelos, 36, 46, 113
molino de viento, 149
momento angular, 36, 44, 68
monzón, 22, 44, 64, 68, 113
motores a gasolina, 145
núcleos de condensación, 11
NAO, 69, 71, 86, 98
neolítico, 179
Nigeria, 189, 218, 219
nitrógeno, 10
nivel del mar, 79, 94
no excluible, 165
Norte América, *véase* América del Norte
te
Norteamérica, *véase* América del Norte
te
nubes, 11, 22, 27, 29, 59
Nueva York, 198, 199
Nueva Zelanda, 102
oblicuidad, 63, 73
OECD, 135–138
OIT, 222
onda larga, 29
ondas ecuatoriales, 39
ondas Kelvin, 67
ondas Rossby, 67
OPEP, 131
organo-clorados, 170
orogénesis, 23
Oscilación del Sur, 64
oxígeno, 10, 19
óxido de nitrógeno, 25
ozono, 11, 26, 27, 61, 71
Pacífico, 100
Pacífico, 43, 47
Pakistán, 160, 180, 218
Pakistan, 212
Palestina, 162, 181
parámetros orbitales, 63
paradoja de evaporación, 98
PDO, 69, 105
Pequeña Edad de Hielo, 8
Perú, 102

- pesca, 197, 237
 PET, 163
 pico del petróleo, 129
 Pinatubo, 71
 población
 envejecimiento, 209
 estabilización, 209, 210
 urbanización, 209
 política, 228
 precesión, 63, 74
 precios de la energía, 133
 precipitación, 14, 17, 191
 predicciones, 106
 presión atmosférica, 12
 principio precautelativo, 112
 procesos diabáticos, 41
 producción neta del ecosistema, 119
 producción primaria bruta, 119
 producción primaria neta, 119
 propiedad intelectual, 236
 propionato de dimetilsulfonio, 20
 Protocolo de Kyoto, 1, 77, 81, 107,
 109, 129, 131, 138, 139, 187,
 252
 Protocolo de Montreal, 27
- río Amarillo, 160
 río Colorado, 160
 río Misisipí, 63
 río Nilo, 160
 río San Lorenzo, 63
 radiación solar, 127
 radiación ultravioleta, 25
 rebote elástico, 62, 95
 rectificación, 75
 respiración autótrofa, 119
 respiración heterótrofa, 119
 retroalimentación, 20, 52, 54, 67, 140,
 193
 enfriamiento radiativo, 56
 hielo-albedo, 56, 58
- nubes, 59
 vapor de agua, 56
 revolución verde, 220
 rivalidad, 165
 rubisco, 119
 Rusia, 131, 138, 139, 187, 196
- Sahel, 69
 salinidad, 16, 19
 San Pablo, 198
 sequías, 82
 Shanghai, 198
 Sigmund Freud, 264
 sincronización, 75
 sistema climático, 5
 Sol, 5, 6, 61
 joven, 6, 19
 variabilidad, 7
 sostenibilidad, 128, 160
 Sri Lanka, 194
 Stefan-Boltzmann, 6
 subsidios, 238
 Sudáfrica, 218
 suelo, 183, 192
 Sur América, 61
 Suramérica, *véase* América del Sur
 Sureste Asiático, 189
 Sureste de Asia, 160
 surgencia, *véase* mar
- tóxicos, 202
 Tailandia, 194
 tasa de interés, 243
 teleconexiones, 39, 64
 temperatura, 32, 84
 temperatura superficial, 32
 teorema Arrow-Debreu, 224
 tereftalato de polietileno, 163
 termoclina, *véase* mar
 termohalina, *véase* mar
 termosfera, 9
 Thomas Schelling, 108

- tifones, *véase* huracanes
- Tocqueville, 221
- Tokio, 198
- topografía, 21
- tormentas de polvo, 184
- tormentas eléctricas, 22
- trópicos, 39
- trabajo, 222
- transferencia de tecnología, 143
- transpiración, 191
- transporte, 131, 204
- tropopausa, 12
- troposfera, 12
- turbinas, 148
- Turquía, 139

- Ucrania, 139
- urbanización, 198, 199, 209–211, 258,
261–264, 266, 267
 - transporte, 269, 271–273
- uso del suelo, 119, 187
- uso eficiente de la energía, *véase* energía
- uso eficiente del agua, *véase* agua

- vapor de agua, *véase* agua
- variabilidad climática, 60
- variabilidad solar, *véase* Sol
- vegetación, 19
- viento gradiente, 39
- Vietnam, 194
- volcanes, 11, 70
- volumen de agua, *véase* agua
- Vostok, 104

- Yemen, 162, 181
- Younger Dryas, 63, 104, 110

- Zcit, 42, 45
- Zimbabwe, 218