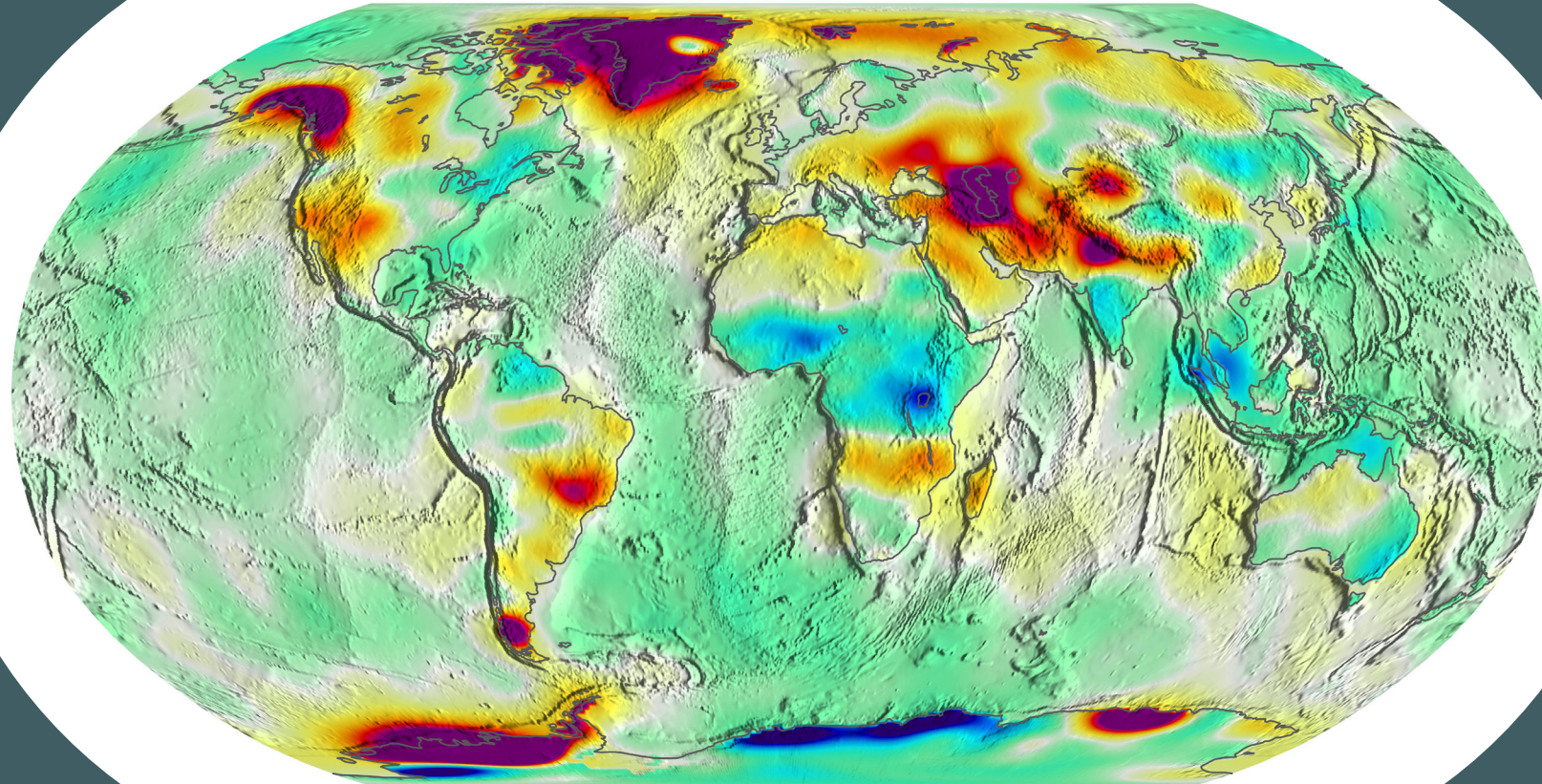


Ciencias Exactas y Naturales para la Gestión Ambiental

GRACE-FO: Dec-2021 surface mass anomalies (rel. to 2005-01-01 to 2010-12-31)



-0.3 -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3
Units: meters of equivalent water height

Miguel A. Blesa y Daniel S. Cicerone

Blesa, Miguel A.

Ciencias exactas y naturales para la gestión ambiental / Miguel A. Blesa; Daniel S. Cicerone.
- 1a ed.- Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias, 2020.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-28123-8-6

1. Ciencias Naturales. 2. Educación Ambiental. I. Cicerone, Daniel S. II. Título.
CDD 577

Ficha de catalogación

CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL
Miguel A. Blesa y Daniel S. Cicerone

Diseño: AAPC Edición: AAPC
Maquetador: Franco Cicerone

Editado en 2020 por



Prohibida su reproducción total o parcial sin citar la fuente

ISBN Nº 978-987-28123-8-6

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723

<https://www.aargentinapciencias.org/>

© 2020 ASOCIACIÓN ARGENTINA PARA EL PROGRESO DE LAS CIENCIAS

Nuestra portada

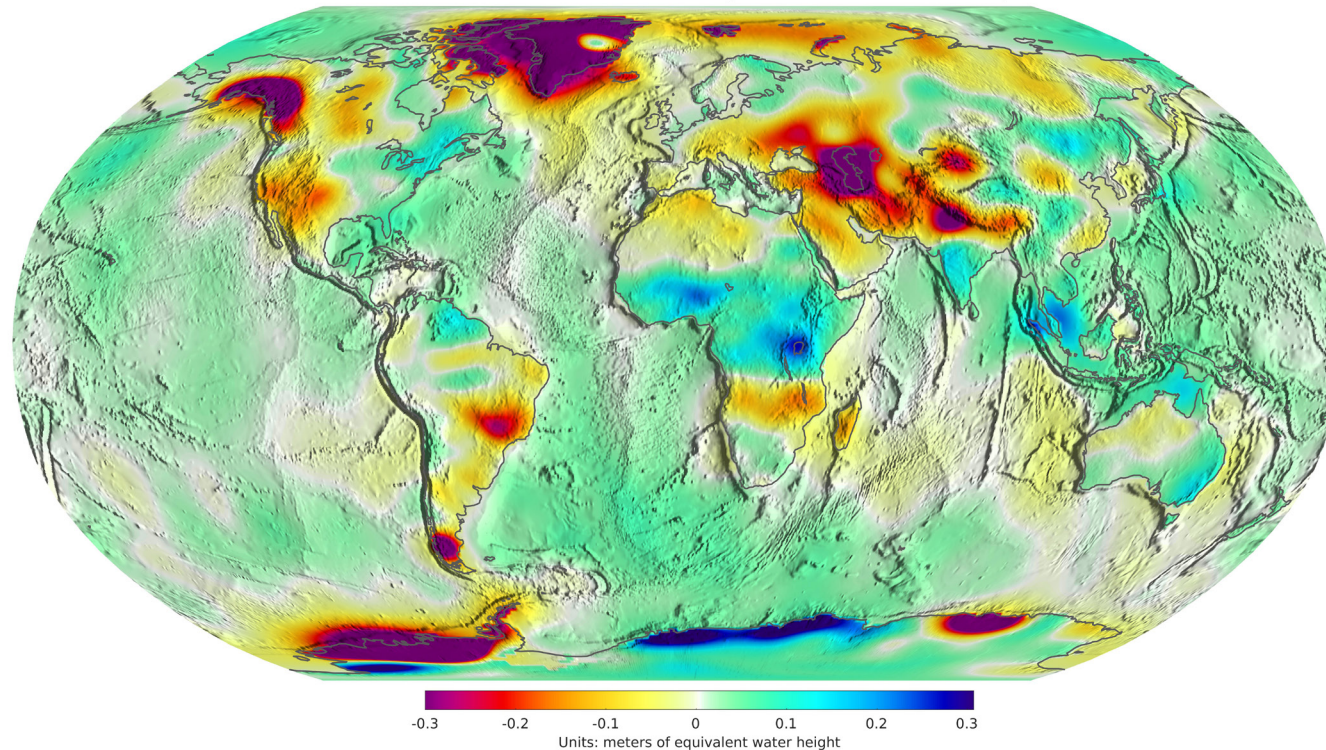
El sistema Tierra se caracteriza por la existencia de grandes ciclos biogeoquímicos que regulan todo el funcionamiento planetario. Másicamente el más importante es el ciclo hidrológico, que también es el más relevante para la gestión ambiental. Las modernas herramientas de monitoreo satelital permiten seguir los cambios en las capas de hielo y los glaciares, el almacenamiento de agua subterránea y cerca de la superficie, la cantidad de agua en los grandes lagos y ríos, así como los cambios en el nivel del mar y las corrientes oceánicas. Proporcionan una visión global integrada de cómo evolucionan el ciclo del agua y el equilibrio energético de la Tierra - mediciones que tienen importantes aplicaciones para la vida cotidiana.

Las observaciones satelitales de los cambios en la distribución del agua se integran con otros datos dentro de un modelo de computadora que simula los ciclos de agua y energía. Luego, el modelo produce, entre otros resultados, mapas que presentan la variación en el tiempo de la distribución del agua a tres profundidades: humedad superficial del suelo, humedad del suelo de la zona de la raíz y agua subterránea poco profunda. Los mapas proporcionan datos continuos sobre la humedad y las condiciones del agua subterránea en todo el paisaje. Estos mapas, por ejemplo, contribuyen a evaluar las áreas que pueden necesitar asistencia financiera debido a pérdidas por sequía.

Nuestra carátula muestra un mapa con la distribución del agua construido a partir de observaciones (anomalías de masa) de los satélites de la misión GRACE-FO del 6 de abril de 2020. En tierra, los colores rojos indican valores por debajo del promedio terrestre de contenidos de agua; mientras que los colores azules muestran contenidos por sobre el promedio terrestre de contenidos de agua (incluyen hielo, nieve, humedad y agua subterránea).

GRACE-FO es una asociación entre la NASA y el Centro Alemán de Investigación de Geociencias (GFZ).

GRACE-FO: Dec-2021 surface mass anomalies (rel. to 2005-01-01 to 2010-12-31)



CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL

¿Se puede encarar tareas de gestión ambiental sin un conocimiento razonable sobre el funcionamiento de nuestro planeta, de su geología, del comportamiento de las sustancias químicas, de la biología y de la ecología (y de su ropaje matemático)? Creemos que la respuesta es NO. El desafío de esta obra es, precisamente, contribuir a que un profesional de la Gestión Ambiental adquiera un manejo operativo de los conceptos científicos fundamentales en el desarrollo cotidiano de sus actividades y que disponga de un texto de referencia y de consulta. ¡Te invitamos a recorrer sus capítulos!

MIGUEL A. BLESA y DANIEL S. CICERONE



Miguel Angel Blesa

Doctor en Química (UNLP), es Director del Doctorado en Ciencia y Tecnología Mención Química de la Escuela de Hábitat y Sostenibilidad (UNSAM). Fue Investigador Superior de CONICET y CNEA, Gerente de Química y Coordinador de Actividades Ambientales (CNEA), Secretario de Planeamiento y Políticas del MINCyT, Presidente de la Asociación Argentina para el Progreso de la Ciencia y Presidente de la Asociación Interciencia. Es Diploma al Mérito Konex en Química 2003, Premio Química 2004 de la Third World Academy of Science (TWAS), Premio MERCOSUR Integración de Ciencia y Tecnología 2006, Doctor Honoris Causa por UNSAM y Académico de las Academias Nacional de Ciencias (Córdoba), Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ANCEFN) y de Ciencias Latinoamericana.



Daniel Salvador Cicerone

Licenciado en Oceanografía con orientación Química Marina y Doctor en Química de la Universidad Nacional del Sur, es Gerente de Gestión Ambiental de CNEA, donde es responsable del desarrollo e implementación del Sistema de Gestión Ambiental, y Profesor Asociado de la Escuela de Hábitat y Sostenibilidad (UNSAM), donde es Coordinador del Doctorado en Ciencia y Tecnología Mención Química. Sus intereses abarcan la movilización de contaminantes en sistemas naturales, la evaluación de la calidad de aguas y suelos; el modelado y predicción del comportamiento e impacto de los contaminantes en el ambiente; y el desarrollo y optimización de tecnologías de purificación de aguas, de tratamiento de efluentes y residuos industriales



ÍNDICE

0. Introducción.....	1
1. El planeta tierra: su estructura y su balance energético	3
1.1. Los orígenes del planeta	3
1.2. La estructura de la tierra	4
1.3. Los flujos de energía desde el interior de la Tierra	6
1.4. La hidrosfera	9
1.5. La atmósfera	12
1.6. El Sol	12
1.7. Radiación electromagnética	15
1.8. Balance energético en la Tierra	17
1.9. La biosfera	18
1.10. Los flujos de materia en el planeta	19
1.11. La ley de conservación de la energía	20
1.12. Eventos extremos.....	21
1.13. Conclusiones	22
1.14. Bibliografía	22
2. La descripción química del mundo material.....	23
2.1. Introducción	23
2.2. La descripción de la materia	23
2.3. Tamaño y forma de los átomos	24
2.4. Las moléculas.....	26
2.5. Algunos ejemplos de ecuaciones químicas	30
2.6. El agua	32
2.6.1. Estructura del agua.....	32
2.6.2. Propiedades del agua	33
2.7. Las sustancias químicas fabricadas por el hombre.....	34
2.8. Impacto ambiental de las sustancias químicas fabricadas por el hombre	38
2.9. Tipos de reacciones químicas en el agua	38
2.9.1. Reacciones ácido-base.....	39
2.9.2. Reacciones de óxido-reducción	41
2.10. Soluciones, mezclas y concentraciones	42
2.11. Química atmosférica	43
2.12. Índices de Calidad	46
2.12.1. Índices de calidad del Aire	46
2.12.2. Índices de Calidad de Agua.....	47
2.12.3. Índice de Capacidad Agrológica de Suelos	52
2.13. Bibliografía	53

3. La vida como fenómeno fisicoquímico	55
3.1. Introducción	55
3.2. Los orígenes de la vida	55
3.3. Las moléculas de la vida	56
3.4. Las reacciones metabólicas y las enzimas	61
3.5. Toxicología	61
3.6. Ecología	63
3.7. Biodiversidad y dinámica poblacional	66
3.8. Bibliografía	68
4. Actividad humana y el planeta: el antropoceno	69
4.1. Dinámica de la evolución de la población humana	69
4.2. La revolución industrial	71
4.3. El Desarrollo Sostenible	74
4.4. El Antropoceno	76
4.4.1. Generalidades	76
4.4.2. El adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico	77
4.4.3. La naturaleza de los suelos y su degradación	78
4.4.4. La pérdida de biodiversidad	79
4.4.5. Fenómenos climáticos intensos de origen natural	80
4.4.6. Fenómenos climáticos afectados por la actividad humana: el cambio climático global	81
4.5. Bibliografía	88
5. La contaminación ambiental	89
5.1. Introducción	89
5.2. Background o Fondo Natural	89
5.3. Sustancias tóxicas de origen natural	89
5.4. Contaminación de origen antrópico	92
5.4.1. Generalidades	92
5.4.2. Contaminación de alimentos	93
5.4.3. Contaminación del aire	94
5.4.4. Contaminación química del agua	94
5.4.1. Contaminación de suelos	96
5.5. Contaminación microbiológica	98
5.5.1. Generalidades	98
5.5.2. Organismos responsables y enfermedades de transmisión hídrica	100
5.5.3. Análisis microbiológico del agua	101
5.5.4. Desinfección	101
5.6. Bibliografía	103

6. Las matemáticas en la gestión ambiental	104
6.1. Representación gráfica de algunas funciones matemáticas	104
6.1.1. La función lineal	104
6.1.2. La función cuadrática	104
6.1.3. La función hiperbólica	104
6.1.4. La función logaritmo	105
6.1.5. Las funciones trigonométricas	106
6.2. Derivadas e integrales	107
6.3. Funciones de distribución	107
6.4. Tratamiento estadístico de resultados de mediciones experimentales	108
6.4.1. Las mediciones en el laboratorio	109
6.4.2. ¿Cómo describir el error de las mediciones?	109
6.4.3. El significado de los valores guía	110
6.5. Vectores para describir alejamiento de los parámetros químicos con respecto a los valores considerados como adecuados	110
6.6. La construcción de índices para describir realidades complejas	111
6.6.1. Indicadores e índices	111
6.7. Los modelos matemáticos de fenómenos complejos	114
6.8. Bibliografía	115
7. Índice de tablas	119
8. Índice de figuras	120
9. Índice de cuadros	122

NOTA SOBRE SEGUNDA IMPESIÓN DE LA PRIMERA EDICIÓN

Durante el año 2020 el curso de la Maestría en Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de San Martín que dio origen a este libro se dictó en forma virtual por las restricciones sanitarias vigentes en esos momentos. En dicho curso los alumnos hicieron uso extensivo del libro, y en ese proceso encontraron errores y temas que era necesario clarificar. En base a esas observaciones, y a la revisión propia de los autores se llegó a la presente versión, que debe considerarse una reimpresión corregida de la versión original. Vaya nuestro agradecimiento a Susana Caruso, Javier Martínez, Noelia Monsalvo, Marina Ailén Picollo, Agustín Roggero, Analia Saettone, Lucía Umpiérrez y muy especialmente Silvana Heisecke por la colaboración.

Los años pasados desde la primera impresión están haciendo aconsejable una revisión mucho más profunda del texto, que encararemos próximamente. En particular la Sección 4 del Capítulo 4, El antropoceno requiere una reescritura para reflejar la situación en 2022; como es bien sabido, el cambio climático se ha ido acelerando y el panorama hoy es aun más preocupante que en 2020. El Panel Internacional para el Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC-ONU) ha emitido un nuevo documento *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* () que muestra los drásticos cambios de los escenarios del cambio climático. Estos hallazgos no se reflejan en la presente versión de nuestro libro, y se recomienda fuertemente consultar el informe del IPCC para una visión más actualizada, hasta tanto demos a luz a la segunda edición.

Miguel A. Blesa y Daniel S. Cicerone
San Martín, Febrero de 2022

INTRODUCCIÓN

La palabra gestión está definida en el diccionario de la Real Academia Española como acción y efecto de gestionar (hacer diligencias conducentes al logro de un negocio o de un deseo cualquiera). Otras definiciones nos dicen que se trata de:

- La acción y efecto de gestionar las actividades humanas y sus impactos.
- La estrategia mediante la cual se organizan las actividades antrópicas que afectan al ambiente, con el fin de lograr una adecuada calidad de vida, previniendo o mitigando los problemas ambientales.
- Las funciones administrativas que desarrollan, implementan y monitorean la política ambiental de una organización.
- La acción y efecto de gestionar aquellas actividades de una compañía que tienen impacto o potencial impacto en el ambiente del "conjunto de trámites que se llevan a cabo para resolver un asunto".

La Gestión Ambiental (del ambiente) refiere entonces a las diligencias que conducen al logro de un negocio o deseo ambiental (la palabra "negocio" es utilizada aquí bajo la definición de aquello que es objeto o materia de interés). Estas diligencias se llevan a cabo en el marco de un Sistema de Gestión Ambiental (ISO14001:2015) que refiere al "conjunto de elementos de una organización interrelacionados o que interactúan para establecer políticas, y objetivos y procesos para el logro de estos objetivos ambientales. El deseo ambiental de un país, ciudad, empresa, grupo de interés se encuentra definido en su Política Ambiental. Por lo tanto, la Gestión Ambiental es el conjunto de diligencias (acciones) que conducen al logro de los objetivos definidos en la Política Ambiental.

Por ejemplo, la Gestión Ambiental en Argentina referirá a todas aquellas acciones que permitan implementar la Política Ambiental de nuestro país. La misma queda definida en el Artículo 2 de la Ley General del Ambiente 25675, y dice que deberá cumplir los siguientes

objetivos:

- Asegurar la preservación, conservación, recuperación y mejoramiento de la calidad de los recursos ambientales, tanto naturales como culturales, en la realización de las diferentes actividades antrópicas;
- Promover el mejoramiento de la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras, en forma prioritaria;
- Fomentar la participación social en los procesos de toma de decisión;
- Promover el uso racional y sustentable de los recursos naturales;
- Mantener el equilibrio y dinámica de los sistemas ecológicos;
- Asegurar la conservación de la diversidad biológica;
- Prevenir los efectos nocivos o peligrosos que las actividades antrópicas generan sobre el ambiente para posibilitar la sustentabilidad ecológica, económica y social del desarrollo;
- Promover cambios en los valores y conductas sociales que posibiliten el desarrollo sustentable, a través de una educación ambiental, tanto en el sistema formal como en el no formal;
- Organizar e integrar la información ambiental y asegurar el libre acceso de la población a la misma;
- Establecer un sistema federal de coordinación interjurisdiccional, para la implementación de políticas ambientales de escala nacional y regional;
- Establecer procedimientos y mecanismos adecuados para la minimización de riesgos ambientales, para la prevención y mitigación de emergencias ambientales y para la recomposición de los daños causados por la contaminación ambiental.

Los seres humanos interactuamos con el ambiente (medio abiótico y biótico) en que vivimos, a partir de nuestras acciones cotidianas desarrolladas en el medio

socioeconómico y cultural; sean ellas desde las más sencillas como respirar, hasta las más complejas como construir naves para explorar el espacio. El ambiente, por su parte, también interactúa con nosotros: desde asegurarnos la estabilidad al caminar por la fuerza de gravedad y la resistencia del suelo que pisamos; hasta resquebrajar la ruta por la que transitamos en un terremoto, las sequías prolongadas y/o inundaciones que arrasan con campos de cultivo, poblaciones, etc.

La Gestión Ambiental se ocupa de identificar y valorar esas interacciones. Las comunica, regula, propone e implementa procedimientos para minimizar aquellas que son perjudiciales para el ambiente y para los seres humanos o sus proyectos. Lo hace con la finalidad de: asegurar la preservación de la calidad, cantidad y sostenibilidad de los recursos del medio abiótico y biótico (pero también los del medio socioeconómico y cultural); conservar la diversidad biológica; mantener el equilibrio y dinámica de los sistemas ecológicos; posibilitar no solo la sustentabilidad ecológica, sino también la económica y social. La "caja de herramientas" de los profesionales en gestión ambiental surge de la normas ISO 14000, en particular la ISO 14001:2015, que provee un marco de referencia para la construcción de un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) acorde con las necesidades y responsabilidades de cada empresa u organización. No es el objeto de este libro estudiar o analizar las normas ISO 14000; más bien se busca que quienes se ocupan de la gestión ambiental comprendan los principios físicos básicos (de la física, la química, la biología y la geología) que determinan los requerimientos establecidos en las normas ISO.

Entonces, ¿quiénes se ocupan de la gestión ambiental? Una amplia variedad de profesionales que trabajan en empresas, organismos públicos y privados, gobierno, universidades, grupos de interés público, etc.

Cuando el énfasis de la Gestión Ambiental está puesto en los aspectos normativos y regulatorios, la actividad se enmarca claramente en las Ciencias Políticas y Sociales. Sin embargo, los saberes que requiere la

actividad profesional en Gestión Ambiental trascienden claramente los de un especialista en Ciencias Políticas y Sociales. Ya dentro de ese gran conjunto de disciplinas que se ha dado en llamar Ciencias Humanas, se requieren sólidos conocimientos de temas de Geografía (ocupación del territorio), buen manejo de aspectos sociales y culturales, familiaridad con las ciencias económicas y con temas de salud pública, etc.

Pero aun este amplio conjunto de saberes no alcanza: el comportamiento de eso que llamamos ambiente responde a leyes naturales claras, que van más allá de la voluntad e intervención del hombre. Un profesional dedicado a la Gestión Ambiental debe poseer un manejo operativo de estas leyes, que se insertan en la Física, la Química, la Biología y la Geología, y que se visten de un ropaje matemático. Se incorporan así saberes de lo que Bunge llama Ciencias Fáticas (las cuatro primeras) y Ciencias Formales (las Matemáticas) (Mario Bunge, *La Ciencia, su Método y su Filosofía*, Ediciones Siglo Veinte, Buenos Aires, 1971), y que en el título de esta obra hemos llamado por su nombre más tradicional, Ciencias Exactas y Naturales.

Existen innumerables ejemplos de la necesidad de saberes de estas disciplinas. Mencionemos sólo unos pocos: ¿Qué es la biodiversidad? ¿Qué es el cambio climático global? ¿Cuáles son las actividades antrópicas que afectan a la biodiversidad y al cambio climático? ¿Cuáles son las propiedades químicas de los llamados contaminantes orgánicos persistentes (COPs)? ¿Qué es el ozono? ¿Es bueno o es malo generarlo o destruirlo? ¿Qué aspectos debe respetar la gestión del agua (de acuíferos, de ríos, etc.)? ¿De dónde viene la energía que usamos? ¿Qué alternativas de generación de energía tenemos y cuáles son sus ventajas y desventajas? La lista podría prolongarse casi indefinidamente.

Este texto apunta a proveer una descripción del funcionamiento de nuestro planeta, a un nivel adecuado para profesionales de la Gestión Ambiental. Incursiona por lo tanto en temas de la Física, la Química, la Biología y la Geología. Se busca esencialmente dar una idea de las leyes que rigen el funcionamiento de nuestro planeta, incluyendo la actividad biológica que es una característica única del planeta. También se discute el

uso de las herramientas matemáticas.

Dado que los profesionales interesados en la Gestión Ambiental provienen de especialidades muy diversas, es probable que los distintos capítulos representen dificultades muy variables para cada lector. Para el caso de los profesionales provenientes del área de las Ciencias Sociales, hay secciones de lectura fácil y poco uso de las matemáticas y de las ecuaciones físicas y químicas. Otras, necesariamente, describen aspectos en los cuales es imposible evitar el uso de los formalismos de las ciencias exactas y naturales. La lectura puede ser selectiva y los textos más especializados pueden eventualmente convertirse en una referencia a la cual recurrir en caso de necesidad.

En la confección de este texto hemos aprovechado el material de diversos artículos escritos previamente. Es así que el Capítulo 1 toma mucho material del artículo *El Planeta Tierra: su estructura y su balance energético*, de Miguel A. Blesa y Daniel S. Cicerone, publicado en la Revista Núcleos (UN del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires), Nº 1, 2014, páginas 4-33. En la Sección *Toxicología* del Capítulo 3 se usa material de *Historia Natural y Cultural del Mercurio*, de Miguel A. Blesa y Gerardo D. Castro, 2015, Editorial AAPC (). De la publicación electrónica *Grandes temas ambientales. Presentación de la serie*, de Miguel A. Blesa () se tomó material para las secciones Ecología (Capítulo 3) y La revolución industrial (Capítulo 4). La sección contaminación microbiológica del Capítulo 5 se basa en el artículo *La contaminación biológica del agua y la desinfección solar* de Cecilia Paulino, María Cristina Apella, Ramón Pizarro y Miguel A. Blesa, *Ciencia e Investigación* 60, 12-29 (2010). En ese mismo Capítulo, los Cuadros 5-1, 5-2 y 5-7 recogen material del artículo *La contaminación del agua por metales* de Miguel A. Blesa, *Ciencia e investigación* 60, 30-48 (2010).

Se han venido usando versiones preliminares de este libro como material bibliográfico del módulo Ciencias Físicas y Naturales para la Gestión Ambiental de la Maestría en Gestión Ambiental que ofrece la Escuela de Hábitat y Sostenibilidad de la Universidad Nacional de San Martín. El desafío de presentar estos temas a cohortes formadas por alumnos de la más diversa

procedencia fue el origen de esta obra. Después fuimos ampliando los temas tratados, de forma que en su versión actual constituye también una fuente de referencia de diversos temas que consideramos importantes para la Gestión Ambiental. Ello llevó a incluir material de muy variado grado de especialización. Lógicamente, es imposible cubrir todos los temas tratados en este libro en un curso breve como el que originó esta obra, pero entendemos que siempre es posible realizar una selección de temas para adecuarse a cualquier formato de curso.

Nuestro agradecimiento a los "conejos de India", que debieron familiarizarse con conceptos muy ajenos a su formación en un módulo extremadamente corto.

1. EL PLANETA TIERRA: SU ESTRUCTURA Y SU BALANCE ENERGÉTICO

1.1. Los orígenes del planeta

Las ciencias brindan en la actualidad una descripción detallada de la forma en que funciona el Planeta Tierra. Lejos estamos de las visiones que lo describían inconmensurable, inmutable y eterno. Ahora conocemos bien sus dimensiones, podemos poner fecha a su origen y prever que no es eterno, y sabemos que, lejos de ser inmutable, está sujeto a constantes cambios, en todos sus niveles. Estos cambios son a menudo imperceptibles porque las escalas de tiempo son muy largas, como se muestra en la Figura 1-1. Superpuestos a esos cambios irreversibles, están los típicos cambios estacionales, "los ritmos de la naturaleza". Como ejemplo de estos cambios cíclicos de períodos cortos, la Figura 1-2 muestra la evolución de las temperaturas diarias máximas en la Ciudad de Buenos Aires, en las décadas 1991- 2000 y 2001-2010, y en los años 2011-2018.

Más adelante volveremos sobre los cambios cíclicos de período corto. Ahora nos concentraremos en la evolución en escalas de tiempo muy largas. La historia geológica de la Tierra se divide en eones, constituidos por eras; éstas tienen varios períodos, los que a su vez se dividen en épocas. La reconstrucción de la historia geológica se basa en el estudio de los diversos estratos que forman las rocas, entendiéndose que los estratos más profundos son más antiguos. La geología provee herramientas para la datación bastante precisa de la fecha de formación de cada estrato. La naturaleza de las rocas, y en particular los fósiles que se incorporan a los estratos, son usados como indicadores de los grandes cambios que ocurrieron en el planeta a lo largo de su evolución. La Figura 1-3 muestra esta clasificación, con más detalle para los tiempos más recientes. Incluso se suele subdividir a las épocas en edades (no mostradas en la figura). Se alcanza a distinguir la segunda época

Figura 1-1

Cronología del universo (tomada, con modificaciones, de la imagen diseñada por el *NASA/WMAP Science Team* (WMAP: Wilkinson Microprobe Anisotropy Probe). Para una interpretación detallada, consultar la página.

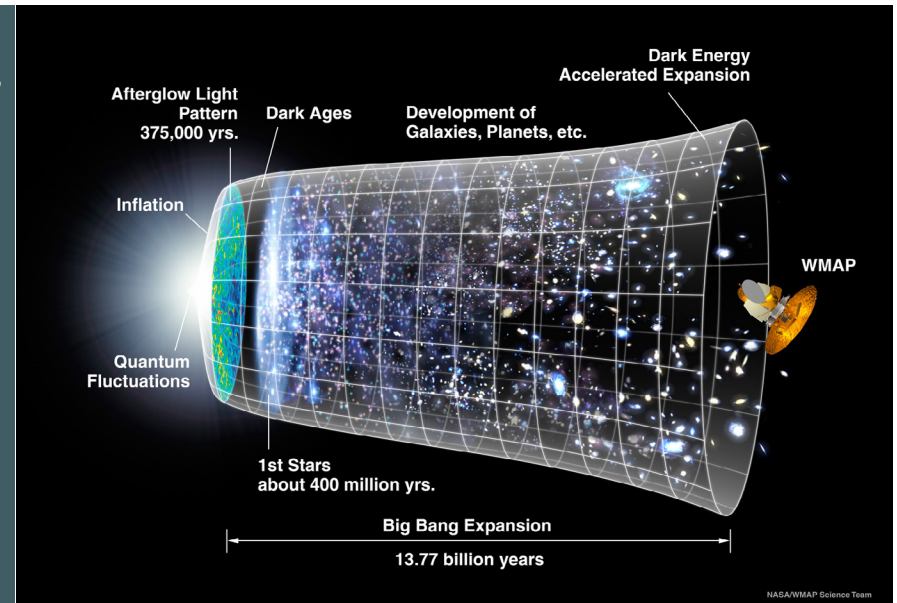
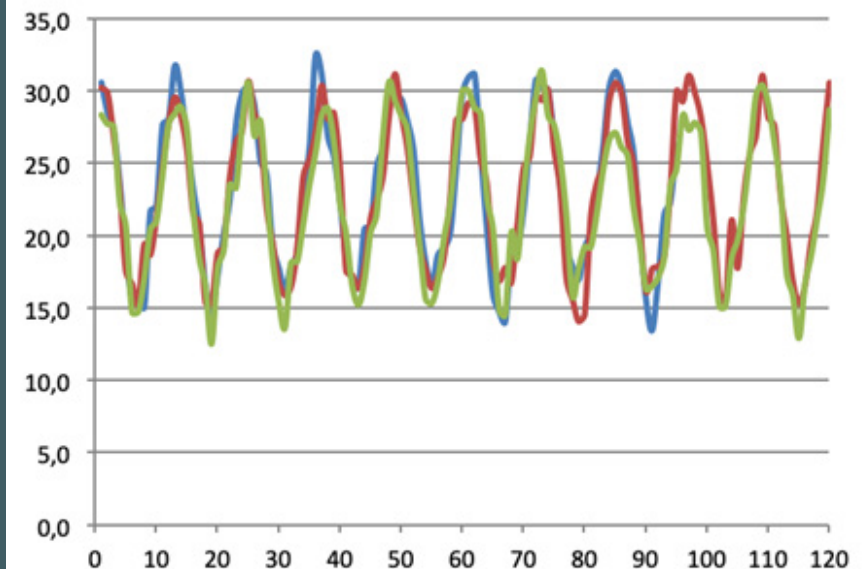


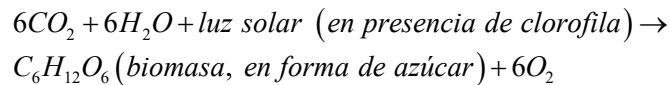
Figura 1-2

Temperaturas máximas diarias en la Ciudad de Buenos Aires en períodos de 120 meses. En verde, años 1991-2000; en rojo, años 2001- 2010; en azul, años 2011-2018. Escala vertical: temperatura en grados Celsius. Para una interpretación detallada, consultar la página.



(el Holoceno) del período actual, el Cuaternario. Esta época comienza hace 11.700 años, con el fin de la última glaciación y la aparición de la civilización del hombre. Como veremos en el Capítulo 4, se ha propuesto ya el fin del Holoceno y el comienzo, en fecha a definir, de una nueva época, el Antropoceno.

La vida apareció en la Tierra hace unos 3.600.000.000 años. La Figura 1-1 muestra que solo mucho después, hace alrededor de 2.000.000.000 años, comenzó la fotosíntesis. Fue entonces cuando los organismos fotosintéticos fueron capaces de fijar dióxido de carbono y agua, y transformarlos en biomasa y oxígeno:



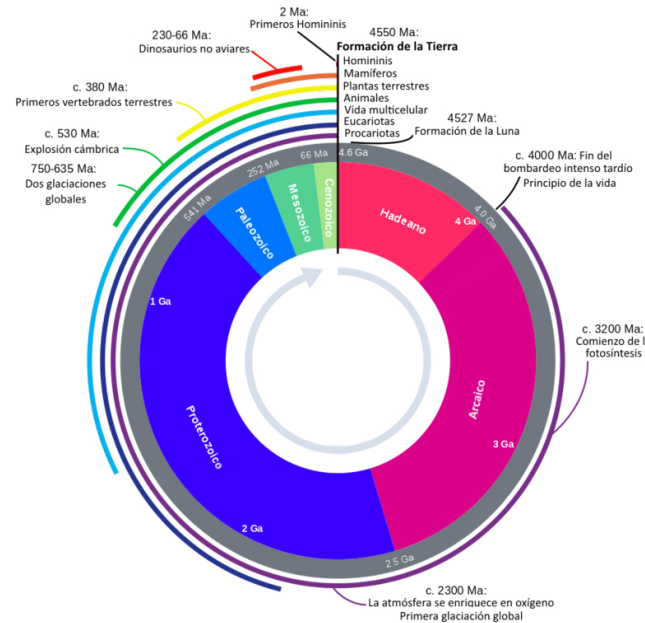
La actividad biológica fotosintética cambió la composición de la atmósfera, remplazando el dióxido de carbono por oxígeno y abrió paso a la evolución posterior, con la aparición de organismos multicelulares y sólo ayer, la aparición del Homo sapiens, en el último 0,05% de la historia de la Tierra. Puede verse que toda la civilización humana es sólo un instante en la historia del planeta, y un instante aún más fugaz en la historia del universo.

El ritmo de cambio actual puede estar muy influido por la actividad antrópica, y ese tema es de crucial importancia, ya que ese ritmo de cambio acelerado es para muchos incompatible con cualquier esperanza de sustentabilidad. Esos cambios han tomado una envergadura tal que ya se ha propuesto que hemos entrado en una nueva época geológica, el Antropoceno (ver Capítulo 4). Aunque todavía no fue aceptada por la comunidad geológica, esta propuesta refleja la magnitud de los cambios que viene experimentando el planeta por acción antrópica.

El sistema solar se formó aproximadamente hace unos 4.600.000.000 años. La materia difusa presente en el espacio esencialmente vacío -la nube estelar o nébula- por colapso gravitacional dio origen a un disco nebular de dimensiones comparables a las del actual sistema solar.

Figura 1-3

Eones, eras, períodos y épocas geológicas. La escala de tiempo está en millones de años con el cero en presente (adaptada de Wikipedia). El eón proterozoico se divide en tres eras (neo, meso y paleo) que a su vez se dividen en períodos que son,, en orden creciente de antigüedad, Ediacárico, Criogénico, Tónico, Ecténico, Ectásico, Calímico, Estatérico, Orosírico, Riácico y Sidérico.



Esa nube estelar estaba compuesta fundamentalmente por hidrógeno, pero contenía también cantidades proporcionalmente minúsculas de átomos más pesados que se habían originado por síntesis en otras estrellas. A partir del disco nebular, en su centro se formó una masa más densa que dio origen al Sol. En el proceso se formó también un disco de acreción formado por gas que orbitaba alrededor del nuevo sol. El enfriamiento del disco de acreción permitió la condensación de los gases y la posterior solidificación de partículas que contenían esencialmente hierro, silicio y oxígeno. A esto siguió la formación de partículas sólidas provenientes de los gases, agua, amoníaco y metano. La colisión de

estas partículas dio origen a planetesimales, pequeños objetos de tamaño del orden del km, y los planetas más pequeños como Mercurio y Marte. Después, por colisión de algunos de estos objetos masivos grandes, se formó la Tierra. La condensación de hielo y dióxido de carbono tuvo lugar a distancias mayores, y explica la formación de los planetas exteriores.

La Tierra original estaba tan caliente que era una masa fundida. Al irse enfriando, se formaron rocas sólidas, y probablemente ya en esa etapa se segregaron gases que formaron una atmósfera constituida esencialmente por dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno (N₂). También se formaron mares por segregación de agua líquida. La actividad volcánica contribuyó a la formación de la atmósfera por emisión de gases.

1.2. La estructura de la tierra

En la actualidad la Tierra es un esferoide, con un diámetro ecuatorial de alrededor de 12.756 km, y un diámetro polar de alrededor de 12.714 km. Su topografía, rugosa para los hombres, muestra una cresta de máxima altura sobre el nivel del mar en el Monte Everest, en el Himalaya, con 8,85 km de altura. La fosa marina más profunda, la fosa de las Marianas en el Océano Pacífico, tiene una profundidad de 10,9 km. La rugosidad de la superficie es entonces del orden de sólo 0,3%, lo que explica las imágenes de esferoide liso que estamos ahora acostumbrados a ver. La capa explorada y accesible al hombre (con excepción de los ámbitos explorados en los viajes espaciales) es pues una delgada capa de cebolla en la superficie del planeta, que se ha dado a llamar zona crítica¹.

También la atmósfera es una delgada capa: el 99,9% de la masa de la atmósfera se concentra en los primeros

1. Según el National Research Council de los EE.UU. en su documento *Basic Research Opportunities in Earth Science 2001*, la zona crítica es un ambiente heterogéneo y superficial, en la corteza superior del planeta, en el cual complejas interacciones químicas, físicas y biológicas que involucran rocas, suelos, agua, aire y organismos vivientes regulan el hábitat natural y determinan la disponibilidad de los recursos que sustentan la vida, tal como hoy la conocemos. (Tomado de Depetris P.J., 2014)

Capítulo 1

50 km. Las mediciones recientes establecen que la masa de la Tierra es de $5,97 \times 10^{27}$ g. La Figura 1-4 muestra un corte de la Tierra (no incluye la atmósfera).

La corteza es una delgada capa, que tiene entre 5 y 70 km de espesor. La corteza continental está compuesta de rocas. Se llama roca a un cuerpo sólido habitualmente compuesto de una mezcla de minerales (ver Capítulo 2). Las minerales más abundantes son los silicatos y aluminosilicatos de calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro u otros metales. Las rocas que constituyen la corteza son llamadas félsicas; un ejemplo típico es el granito, que es una mezcla de tres minerales: cuarzo (SiO_2), mica (una composición típica de la mica es $\text{K}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) y feldespato (una composición típica del feldespato es $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). La corteza oceánica está compuesta de rocas máficas, como el basalto, que contiene silicatos de hierro y magnesio (como por ejemplo el olivino $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$; piroxeno MgSiO_3 ; anfíboles $(\text{Mg}_7(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$, entre otros).

La corteza dista mucho de ser una capa inerte; simplemente, los tiempos asociados con sus cambios son largos. Las rocas félsicas y máficas llegan a la superficie a través de la actividad volcánica; se forman a partir de la lava fundida. El proceso de transformación de los componentes de la corteza, por acción de la atmósfera y de las aguas naturales es llamado genéricamente meteorización. Este fenómeno es el responsable de la formación de los sedimentos, que están formados por material que se disolvió y volvió a precipitar, o que fue pulverizado por acción de los vientos y las lluvias. Esos sedimentos a su vez sufren el fenómeno de diagénesis y metamorfismo, con formación de nuevas rocas, distintas de las ígneas, en la secuencia:

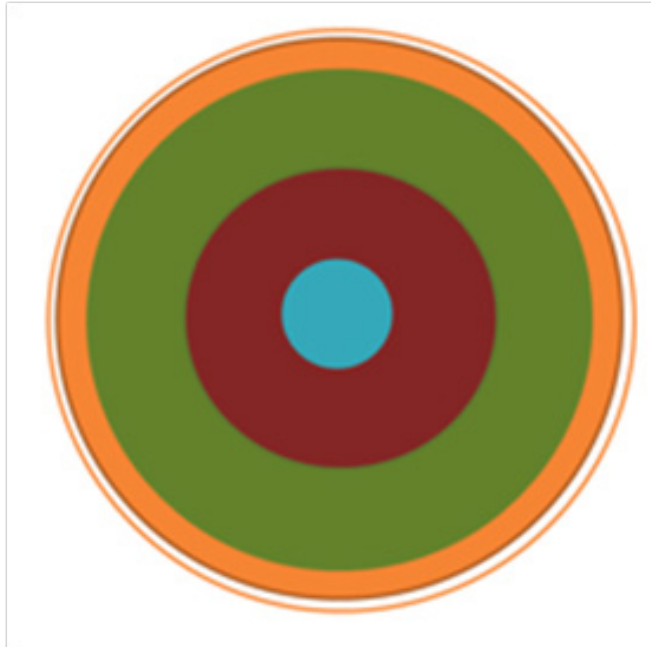
sedimentos → *rocas sedimentarias* → *rocas metamórficas*

Las Figura 1-5 (a) y (b) muestran el gran ciclo que se establece en la corteza. Las rocas ígneas se forman a partir del magma de alta temperatura originado por fusión de rocas sedimentarias y metamórficas (y también de las propias rocas ígneas).

La meteorización es responsable de la formación de

Figura 1-4

Corte esquemático de la Tierra aproximadamente a escala. En celeste, núcleo interno; en marrón, núcleo externo; en verde, manto inferior; en naranja, manto superior; en blanco, corteza. En realidad, la corteza es una delgada capa cuyo espesor, variable entre 5 y 70 km, es despreciable en la escala de la figura. Fuente: Elaboración propia.

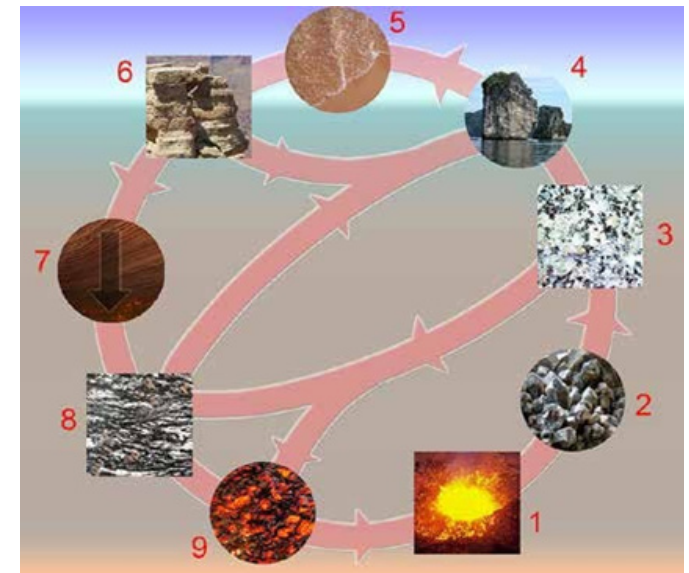


los componentes inorgánicos de los suelos fértiles, en particular de arena, limo y arcilla. Químicamente estos minerales tienen composiciones similares, basadas en sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), y difieren en el tamaño de las partículas que las forman, tamaño que disminuye en el orden de enumeración indicado arriba. La composición de los suelos se discute en el Capítulo 4.

El manto está compuesto por rocas ultramáficas que, en comparación con las rocas máficas, están enriquecidas en magnesio y en hierro. El manto es sólido, pero tiene una cierta fluidez (en escalas de tiempo geológicas). La parte superior del manto compone junto con la corteza

Figura 1-5 (a)

El ciclo de las rocas. 1: Magma; 2: Cristales formados en superficie al enfriarse el magma; 3: Rocas ígneas; 4: Acción de la erosión sobre las rocas ígneas; 5: Sedimentación de los fragmentos erosionados; 6: Sedimentos y rocas sedimentarias; 7: Entierro tectónico y metamorfismo; 8: Rocas metamórficas; 9: Fusión de las rocas metamórficas. Fuente: "Rockcycle" Woudloper/Woodwalker.

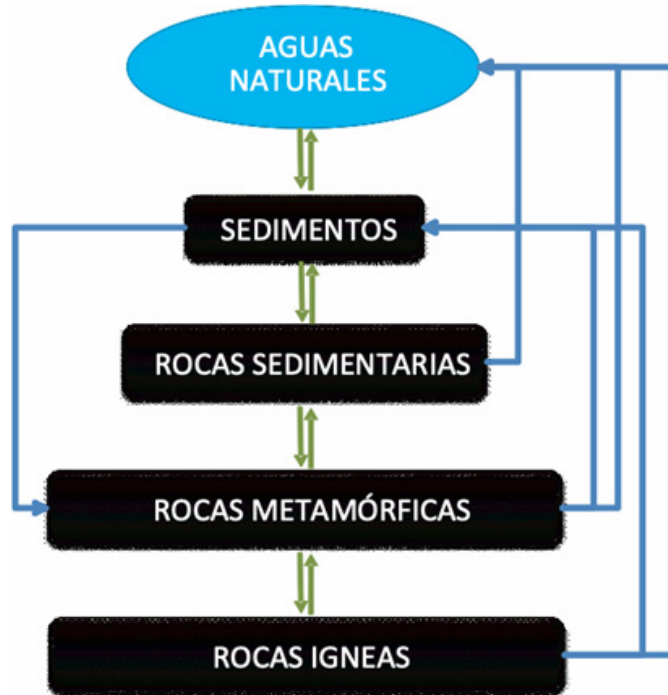


la litosfera. La parte inferior del manto superior se denomina astenosfera, y tiene propiedades mecánicas diferentes. En la litosfera, el manto está formado por placas tectónicas, que pueden desplazarse con diversos tipos de movimientos. La Figura 1-6 muestra las placas tectónicas, tal como se las conoce hoy. Actualmente se cree que en la zona de transición entre el manto superior y el manto inferior (aproximadamente 400 a 550 km de profundidad) existe un gran reservorio de agua, en forma del mineral ringwoodita, un silicato de magnesio que a altas presiones puede contener alrededor del 1% de agua. Las estimaciones conducen a creer que la cantidad de agua en el manto puede

ser mayor que la de todos los océanos juntos. El agua del manto puede llegar a la superficie a través de las erupciones volcánicas.

Figura 1-5 b)

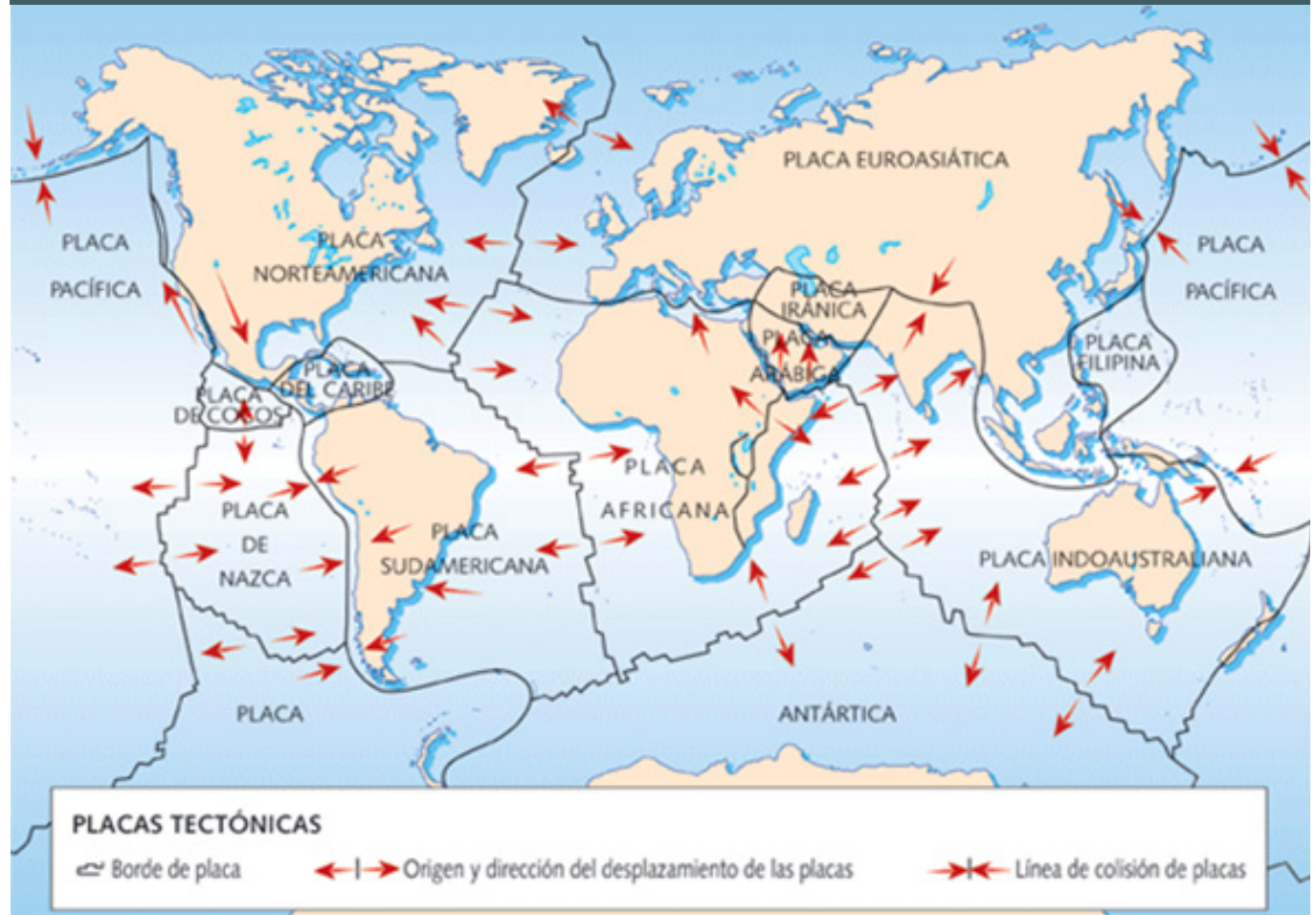
Ciclo esquemático de las rocas entre compartimentos en la corteza terrestre (Modificada de Blesa y col., 2012)



El núcleo es metálico. Contiene fundamentalmente hierro, y también níquel. El núcleo exterior está fundido, mientras que el núcleo interior solidificó. La solidificación del manto fundido es una fuente de calor. En el hierro fundido se establecen corrientes de convección, alimentadas por el calor que se va disipando, y esas corrientes generan a su vez corrientes eléctricas que originan el campo magnético terrestre.

Figura 1-6

Principales placas tectónicas.
Tomado de Juan Carlos Doncel Domínguez



1.3. Los flujos de energía desde el interior de la Tierra

La temperatura en la región central de la Tierra es del orden de 5.500°C , y esa temperatura va disminuyendo hasta alcanzar el valor típico de superficie, 14°C . Existe

pues un importante gradiente térmico, y el interior del planeta está aportando constantemente energía a la superficie. El valor de la energía que llega por segundo a la superficie terrestre ha sido estimado en $4,2 \times 10^{12}$ Joules. Puede compararse este valor con el consumo de energía total por parte del hombre, que se estima es de $1,5 \times 10^{12}$ Joule/s. En otras palabras, el consumo

Capítulo 1

del hombre es del orden de un tercio de la energía que llega desde el interior de la Tierra.

¿Cuál es el origen de esa energía?

Ya se mencionó el aporte de la solidificación de los metales líquidos del núcleo. Este aporte es sin embargo menor. La gran mayoría (tal vez hasta el 80%) proviene del decaimiento radiactivo del ^{232}Th , ^{238}U y ^{40}K (en menor medida, también contribuye el ^{235}U). Estos elementos radiactivos están concentrados en las rocas félsicas de la corteza. El resto proviene de fenómenos físicos, como el efecto de las fuerzas gravitacionales y la solidificación del núcleo exterior ya mencionada.

Cuadro 1-1

Unidades de energía

La unidad de energía del Sistema Internacional (SI) de unidades es el Joule (J). La energía consumida por unidad de tiempo se conoce como potencia, y la unidad de potencia es el vatio, o watt (W). 1 W es simplemente 1J por segundo. Si se consume una potencia de 1000 W (1 kW) durante una hora, la energía total consumida es 1 kWh (kilovatio hora). Debe notarse que mientras el kilovatio es una unidad de potencia, el kilovatio hora es una unidad de energía. Se puede calcular fácilmente que $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$.

En una usina eléctrica, su tamaño se mide por su potencia, es decir por la cantidad de energía que puede producir por unidad de tiempo. En la Argentina, la potencia total instalada del parque de producción eléctrica en 2018 era de 38.300 MW (1 MW = 10^6 W). La Figura 1-7 muestra la contribución a este valor de los distintos modos de generación (Comisión Nacional de Energía Atómica, 2018).

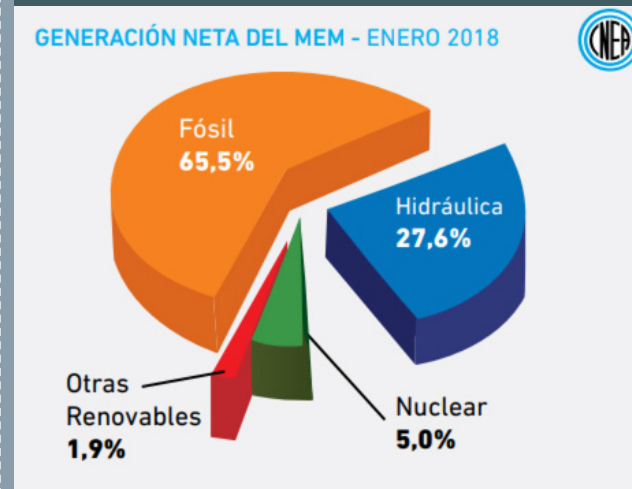
La factura de electricidad refleja la energía total consumida, medida en kWh consumidos.

Por su parte la factura de gas calcula, a partir de los metros cúbicos de gas consumidos, las *kilocalorías*

consumidas. Ésta es otra unidad de energía; $1 \text{ kcal} = 4,19 \text{ kJ}$. Es ésta la energía necesaria para incrementar en 1°C la temperatura de 1 kg de agua.

Figura 1-7

Origen de la generación eléctrica en Argentina en 2018.



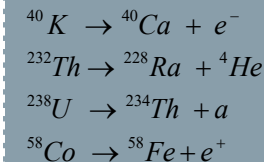
Es también la famosa "caloría" de los regímenes dietéticos (también llamada "caloría grande").

Cuadro 1-2

La desintegración radiactiva

Durante mucho tiempo fue un postulado básico de la Química que los átomos eran indestructibles y que el átomo de un determinado elemento no podía transformarse en el átomo de otro elemento. Para el desarrollo de la ciencia, ese postulado fue crucial, pero como toda verdad científica, era *falsable*, en el sentido que siempre podía aparecer algún experimento que pusiera en evidencias los límites de validez del postulado. Estos experimentos tuvieron lugar en la primera mitad del siglo XX,

con el descubrimiento de la radiactividad. Se pudo comprobar entonces que, en ciertas condiciones, los átomos podían desintegrarse, a través de diversos fenómenos. Los fenómenos más usuales son la eyección, desde el núcleo del átomo, de un electrón negativo, de un electrón positivo, o de una partícula alfa, compuesta por dos protones y dos neutrones. Esas desintegraciones producen cambios en el número de protones y/o en el número de neutrones del núcleo, y van usualmente acompañadas por la emisión de radiación electromagnética rayos γ , (ver Sección 1.7). Escribimos a continuación algunos ejemplos de reacciones de desintegración radiactiva:



Cuadro 1-3

Los volcanes y las aguas termales

En el choque entre dos placas tectónicas, una de ellas puede hundirse debajo de la otra, adentrándose en el manto; es éste el fenómeno de *subducción*. La placa descendiente se funde parcialmente, generando el *magma* (roca fundida) que asciende a través de la corteza, tal como se muestra en la Figura 1-8. El magma fundido que alcanza la superficie pierde rápidamente las sustancias volátiles que contiene, y forma la *lava*, que se enfría rápidamente desde temperaturas que pueden superar los 1000°C . En una erupción violenta también se expulsa material piroclástico, que son pequeños fragmentos de roca que solidifican en el aire al ser expulsados.

Ese magma ascendente da origen a los volcanes llamados de borde convergente, como son los volcanes Copahue y Peteroa. Estos dos volcanes se encuentran en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (ver Figura 1-6).

Ambos están en el límite entre Argentina y Chile; el primero en provincia de Neuquén, y el segundo en la de Mendoza. También hay actividad volcánica en las zonas de divergencia entre placas, como ocurre por ejemplo en Islandia.

Se puede visualizar a los volcanes como cortocircuitos de disipación de la energía del manto. En un estratovolcán, como lo es Copahue, las laderas están formadas por estratos sucesivos, de lava solidificada y de material piroclástico (ver Figura 1-9). La magnitud de la energía liberada desde el interior a través de un volcán puede ser extremadamente grande, como lo ilustra la erupción volcánica en la isla de Krakatoa (Indonesia) en 1883, en la zona de subducción de la placa indoaustrialiana bajo la euroasiática, que hizo desaparecer la isla, generó tsunamis y causó la muerte de más de 36.000 personas. Se estima que la energía liberada fue equivalente a la explosión de un millón de toneladas de TNT, muchos órdenes de magnitud superior a la liberada por la bomba atómica explotada en Hiroshima.

Las zonas de liberación de fluidos desde el interior de la Tierra se conocen como fumarolas. Las fumarolas secas, emitidas en una erupción volcánica, son las que ponen partículas de lava fundida en la atmósfera (ver Capítulo 5). Las fumarolas hidrotermales están constituidas esencialmente por agua, que se calentó en su pasaje por el interior de la Tierra. Las hay en las fosas oceánicas, y también en tierra, donde dan origen a los géiseres y a las aguas termales. Normalmente los géiseres y las aguas termales se encuentran en zonas próximas a fallas. Islandia es un ejemplo con mucha actividad hidrotermal, que también posee gran actividad volcánica. La divergencia entre las placas norteamericana y euroasiática la recorre y es responsable de su vulcanismo (ver Figura 1-10).

Islandia deriva el 30% de su generación eléctrica de fuentes geotermales. La capacidad instalada de generación eléctrica geotermal en 2010 era de 560 MW, lo que equivale a 1,7 kW por habitante (y ese

Figura 1-8

Subducción de placas tectónicas convergentes. Tomado de Wikipedia.

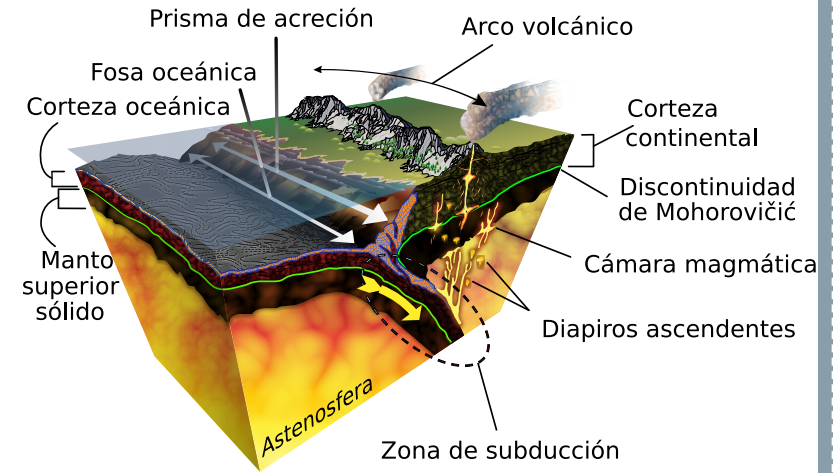
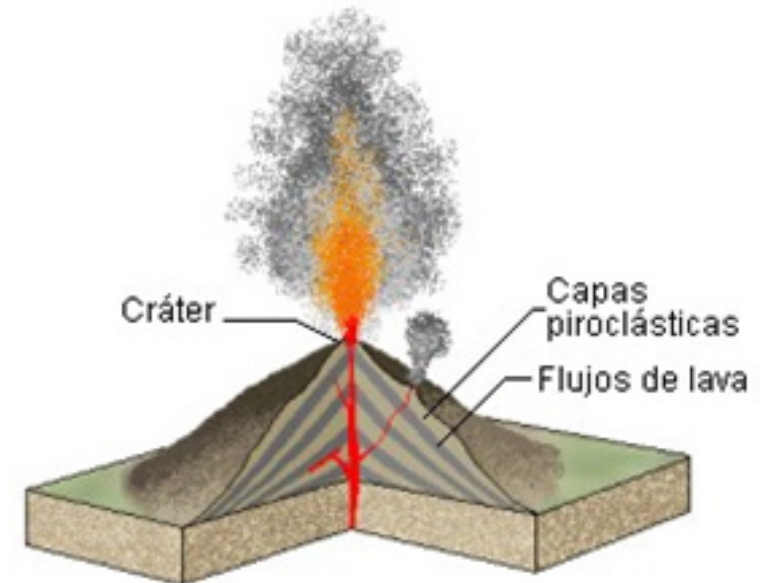


Figura 1-9

Estratovolcán. Tomado de Wikipedia.



Capítulo 1

número no incluye la energía usada directamente para calefacción). Este número se puede comparar con la potencia eléctrica total instalada en la Argentina (ver Comisión Nacional de Energía Atómica 2018), que en 2014 era de menos de 0,8 kW por habitante. La disponibilidad de esta fuente le permite a Islandia enfrentar los rigores climáticos, y lo lleva a ser uno de países con mayor consumo de energía per cápita. La gran disponibilidad de energía geotermal está asociada con volcanes activos, que significan un riesgo ambiental cierto, para los islandeses e incluso para todo el mundo. La erupción de Lakagigar en 1783 fue responsable, directa o indirectamente, de la muerte de un cuarto de la población islandesa, y se le atribuye la causa de la sequía que produjo bajos caudales en el río Nilo y hambrunas consecuentes en Egipto.

Figura 1-10

Divergencia de placas tectónicas bajo Islandia. Tomado de J. Alveirinho Dias.



Los géiseres son erupciones de agua y vapor, que derivan su nombre del Gran Geysir, un géiser islandés. La Figura 1-11 ilustra una secuencia de erupción. En nuestra región son impresionantes los

géiseres de El Tatio, en Chile.

Figura 1-11

Géiseres de El Tatio, Chile. Tomado de denomades.com.



1.4. La hidrosfera

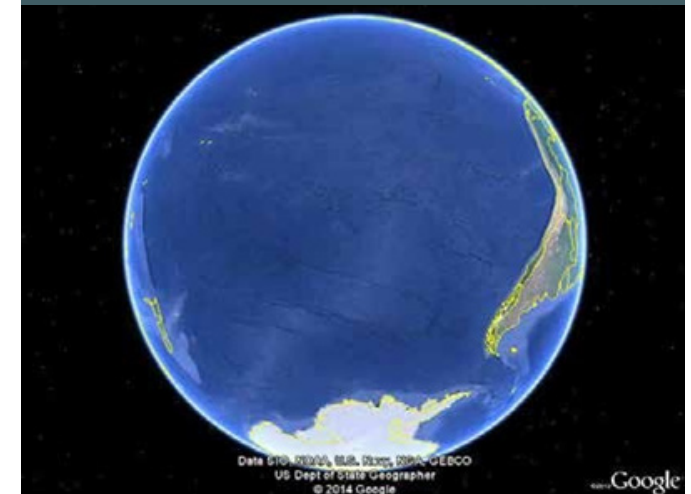
En la Tierra hay aproximadamente $1,4 \times 10^{24}$ g de agua, sin tener en cuenta la que puede haber en la ringwoodita (mineral de la clase de los nesosilicatos, perteneciente al llamado grupo del olivino) del manto. La superficie de la Tierra está cubierta en buena medida por agua líquida, como lo muestra la imagen de Google Earth (Figura 1-12). Se advierten allí también los hielos antárticos. Los océanos constituyen una delgada capa superpuesta a la geode de la tierra que se presenta en la figura 1.4. La profundidad máxima de una fosa oceánica es de cerca de 11 km; los océanos contienen el 97% del total del agua del planeta sin contar el agua del manto.

El agua se mueve desde el océano a las nubes, de éstas por precipitación se forman las aguas superficiales, y el agua regresa al océano por escorrentía. La Figura

1-13 muestra las cantidades de agua existentes en cada reservorio (masas en gramos), y las cantidades que fluyen anualmente entre reservorios (flujos, masas en gramos por año). Además de las aguas superficiales, se forman también la nieve y los hielos, y las aguas subterráneas. Estos dos reservorios son mucho más grandes que el de aguas superficiales (sus inventarios son, respectivamente 275×10^{20} y 82×10^{20} g, respectivamente), pero no se muestran en la Figura 1-13 porque intercambian agua más lentamente con los otros reservorios. Para una descripción más general de los ciclos de la materia, ver Sección 1.10.

Figura 1-12

Imagen del Planeta "Aqua", con grandes masas de agua sólida y líquida. La imagen no muestra el agua atmosférica (nubes). Tomado de Google Earth.



Las aguas dulces son una fracción pequeña del agua del planeta. Esta agua se distribuye en hielos y nieve, aguas subterráneas, lagos y ríos. La Figura 1-14 muestra gráficamente sus importancias relativas; los valores absolutos de sus inventarios se indicaron en el párrafo anterior y en la Figura 1-13.

Las aguas subterráneas forman los acuíferos que, como se ve, constituyen una reserva fundamental del agua

dulce. La Figura 1-15 muestra detalles sobre las aguas subterráneas. Para entender el funcionamiento de las aguas subterráneas, el primer concepto a tener en cuenta es el de vasos comunicantes: en dos recipientes conectados por la base, el agua alcanza el mismo nivel.

La Figura 1-15 muestra un acuífero cautivo, que está limitado por dos capas impermeables, y un acuífero libre, que limita hacia arriba con la capa freática. Esta última es una capa sólida que está saturada con agua en todos sus poros e intersticios. Cuando se perfora un pozo, el mismo será surgente si el terreno es en ese lugar más bajo que el nivel del agua subterránea. En caso contrario será necesario bombear el agua para extraerla.

Los acuíferos confinados no son ríos subterráneos análogos a los ríos superficiales. El agua se mueve mucho más lentamente, siguiendo los intersticios, poros y fracturas del terreno. El tiempo de residencia es el tiempo que transcurre desde que una molécula de agua entra en el acuífero (en la zona de recarga, ver Figura 1-15) hasta que sale por la zona de descarga (no mostrada en la Figura 1-15), que es la zona en la cual el agua subterránea emerge y se incorpora a aguas superficiales. Los tiempos de residencia varían mucho en distintos acuíferos; en general, cuanto más profundo es el mismo, mayor es el tiempo de residencia. Se da el caso extremo de aguas fósiles, acuíferos en los que la velocidad de recarga y de descarga son prácticamente cero. La gran variabilidad de los tiempos de residencia hace que se puedan encontrar valores de 10.000 años o más, y también valores mucho más breves. Las técnicas isotópicas (radionucleidos y trazadores geoquímicos relacionados) desarrollados por el Organismo Internacional de Energía Atómica nos permiten comprender la distribución de las edades de un cuerpo de agua subterránea, así como su movimiento, en períodos de tiempo superiores a los miles de años (*Isotope Methods for dating old groundwaters, IAEA, 2013*).

Los acuíferos libres también intercambian agua por evaporación y por infiltración en toda su extensión, ya que no existe una capa impermeable superior que lo contenga. La Tabla 1.1 muestra los tiempos de residencia.

Figura 1-13

Reservorios y flujos del ciclo hidrológico. Los inventarios de los reservorios están en gramos, y los flujos entre reservorios en gramos por año. Este esquema ignora la posible participación del manto, que es un reservorio de inventario similar o mayor al de los océanos, pero con flujos extremadamente pequeños hacia los otros reservorios. Fuente: Elaboración propia

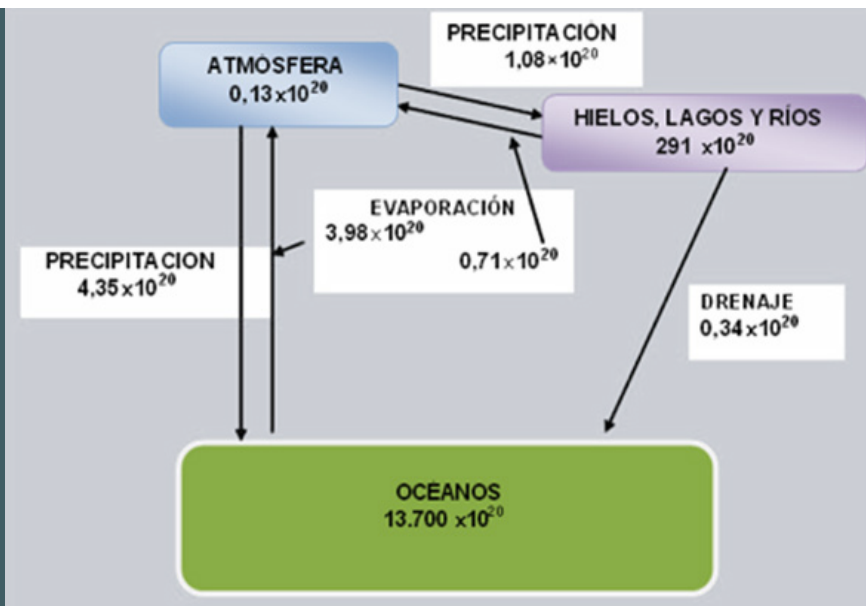
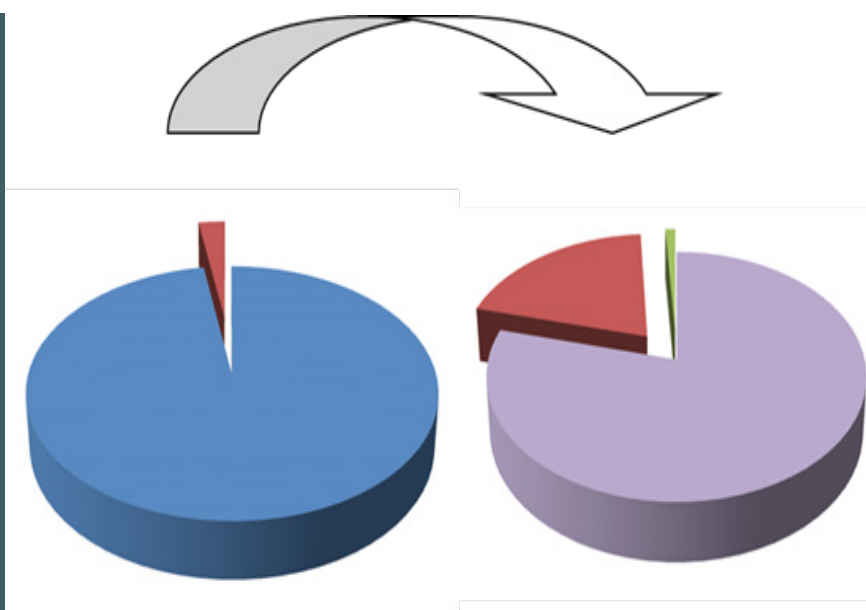


Figura 1-14

Distribución del agua: La torta de la izquierda muestra que el 97,5% es agua de mar (en azul), mientras que el 2,5% es agua dulce (en marrón). La torta de la derecha muestra que los hielos dan cuenta del 79% del agua dulce (en violeta); el agua subterránea representa el 20% (en marrón), y las aguas superficiales solo el 1% (en verde). Fuente: Elaboración propia.



Capítulo 1

Tabla 1.1. Tiempos de residencia del agua en distintos reservorios

Reservorio	Tiempo de residencia en años
Glaciares	20 - 100
Cobertura estacional de nieve	0,15 - 0,5
Humedad del suelo	0,1 - 0,2
Acuíferos superficiales	100 - 200
Acuíferos profundos	10.000
Lagos	50 - 100
Ríos	0,15 - 0,5

La selección de reservorios es más detallada que la empleada en la discusión anterior. Datos tomados de *Fundamentals of Physical Geography* Capítulo 8 de M. Pidwirny y S. Jones.

Figura 1-15

Aguas subterráneas. Tomado de biologiaygeologia.org.

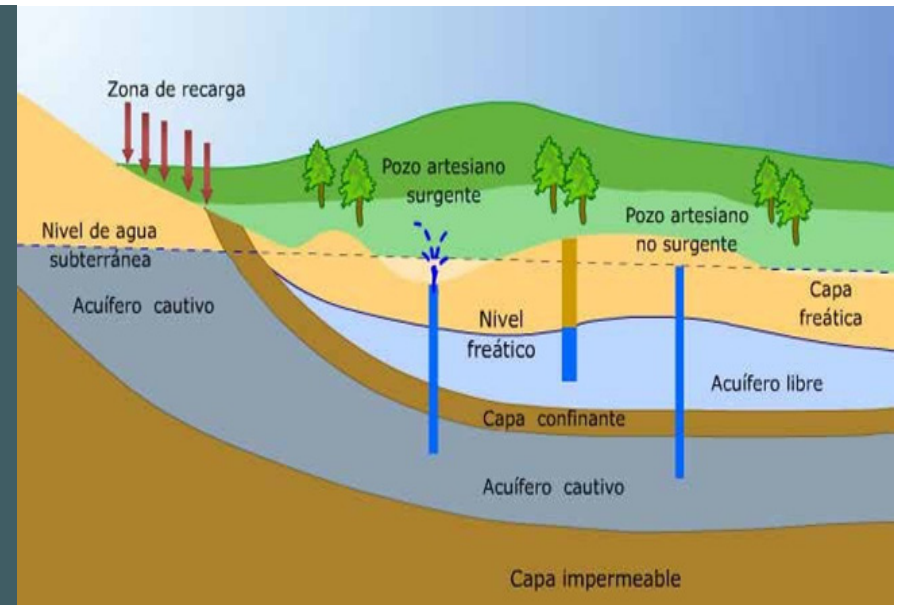


Figura 1-16

El ciclo hidrológico. Tomado del *US Geological Service* en [Wikimedia Commons](https://commons.wikimedia.org).



Finalmente, la Figura 1-16 muestra esquemáticamente el ciclo hidrológico. Este ciclo describe el movimiento del agua en el planeta. Podemos elegir comenzar dicho ciclo con la evaporación del agua, esencialmente en el mar, y en mucha menor medida desde el dosel forestal (la canopia). La evaporación del agua es un fenómeno que requiere energía. Se requieren 2,28 kJ para evaporar 1 gramo de agua, y este valor es responsable de que una fracción importante de la radiación solar entrante en la atmósfera (80 W/m², del orden del 23% del total) se absorba en el proceso de vaporización del agua. Toda esa energía absorbida por el agua en la evaporación es devuelta en las etapas siguientes del ciclo hidrológico. El tema del balance energético del planeta se retoma más adelante. El ciclo hidrológico se completa con la precipitación del agua atmosférica (mediada por la formación de nubes), la formación de aguas y nieves y su regreso al mar a través de la escorrentía de aguas superficiales y aguas subterráneas, estas últimas formadas por infiltración desde la superficie en las llamadas zonas de recarga.

1.5. La atmósfera

La atmósfera es una delgada capa gaseosa que cubre al planeta. EL nitrógeno y el oxígeno dan cuenta del 99% de la masa del aire seco, el argón representa alrededor de 0,9%, y están presentes otras sustancias en cantidades menores. La humedad de la atmósfera es variable; el agua está presente en cantidades variables como vapor de agua y como gotitas de agua líquida y de hielo. En el Capítulo 2 se discutirá la composición de la atmósfera en más detalle.

La masa total de la atmósfera es 5×10^{18} kg. De esta masa, 75% se concentra en los primeros 11 km (tropósfera). La Figura 1-17 muestra las distintas regiones de la atmósfera. Adviértase que el espesor total de la tropósfera es solo el 0,8% del diámetro de la Tierra (algo más de 12.700 km).

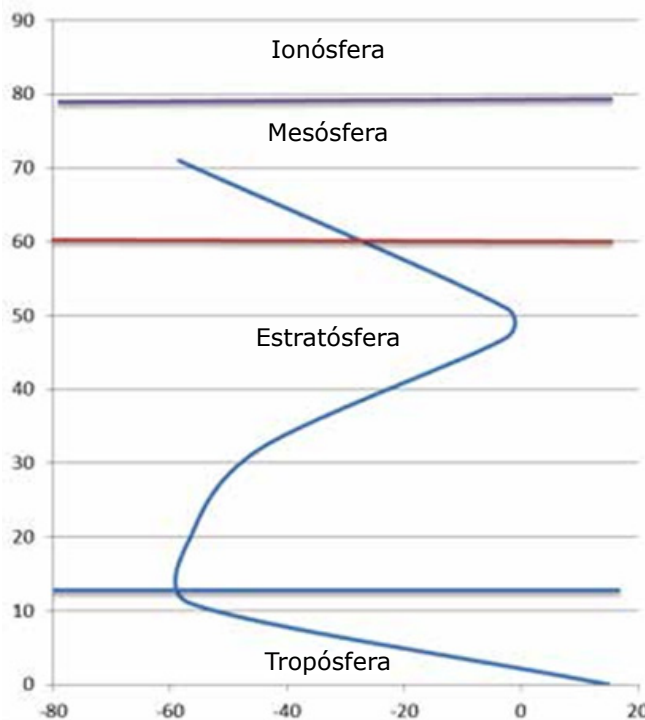
Por encima de la ionosfera (o termosfera), y con una extensión del orden de 60.000 km se extiende la magnetosfera, región en la que el campo magnético terrestre desvía la radiación del viento solar y de los rayos cósmicos (ver Cuadro 1-6), protegiendo así la capa de ozono estratosférico (ver Sección 2.9).

La Figura 1-17 también muestra cómo varía la temperatura con la altitud hasta la mesosfera. En la tropósfera la temperatura disminuye con la altitud, para hacer una pausa y ascender en la estratósfera. En la mesosfera vuelve a disminuir. Aunque no se muestra, la temperatura vuelve a subir fuertemente en la termosfera. Sin embargo, en la termosfera la densidad de la materia es muy baja y el concepto de temperatura adquiere otras connotaciones que no discutiremos.

La Figura 1-18 muestra cómo varía la presión atmosférica, expresada en hectopascales (hPa, eje horizontal) con la altura expresada en metros (eje vertical). La presión depende por un lado de la temperatura, y por otro del número de moléculas por unidad de volumen. Este último número es proporcional a la densidad, que es la masa por unidad de volumen. Ya a nivel del mar (altura 0) esa densidad es muy inferior a la del planeta.

Figura 1-17

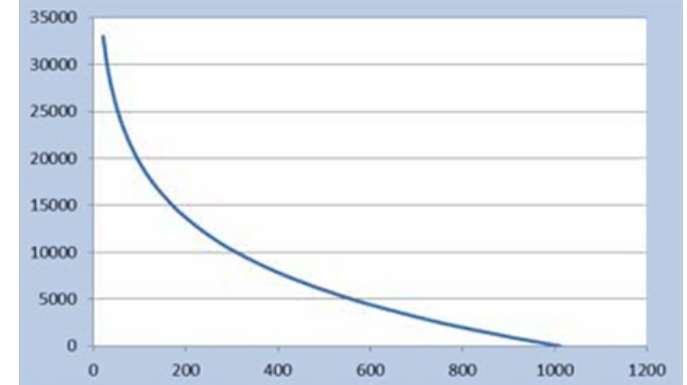
Capas de la atmósfera. Se muestra la temperatura en el eje horizontal (en Celsius) y la altura en el eje vertical (en km). Elaborado con datos de engineering-toolbox.com.



En efecto, la densidad de la corteza es del orden de 2 g/cm^3 , y la densidad promediada general del planeta es del orden de 5 g/cm^3 , mientras que la densidad de la atmósfera en superficie es del orden de $1,1 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, tres órdenes de magnitud menor. La forma del gráfico corresponde aproximadamente a una disminución exponencial de la presión y la densidad con la altura (ver Capítulo 6).

Figura 1-18

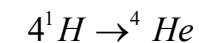
Variación de la presión con la altura en la atmósfera. El eje horizontal representa la presión en hPa, y el eje vertical la altura desde el nivel del mar en metros.



1.6. El Sol

El Sol tiene un diámetro algo más de 100 veces mayor que la Tierra, y una masa más de 300.000 veces mayor. Se encuentra a $1,5 \times 10^8$ km de la Tierra. Su temperatura en el centro es del orden de $1,4 \times 10^7$ K, y en la superficie es de $5,8 \times 10^3$ K (5.800 K).

El Sol es un gigantesco reactor nuclear de fusión. El proceso de fusión libera la energía generada en la fusión de núcleos de átomos de hidrógeno, para formar helio:



Cuadro 1-4**Generación antrópica de energía nuclear**

Hay dos tipos de reacciones nucleares capaces de entregar grandes cantidades de energía. La fusión, como la que ocurre en el Sol y otras estrellas, y la fisión, como la que generó los radiosótopos presentes en las entrañas de la Tierra y es el origen de la energía geotérmica que contribuye desde el interior a mantener naturalmente caliente la superficie del planeta. La fisión involucra la liberación de energía por la ruptura del núcleo de ^{235}U y otros elementos pesados, inducidas por bombardeo con neutrones. En el proceso se forman átomos radiactivos, que emiten radiación y (ver Sección 1.7).

El hombre ha sido capaz de desarrollar tecnologías aprovechando la energía nuclear. Históricamente, los primeros usos fueron bélicos, en particular las explosiones de las bombas de Hiroshima y Nagasaki. Esas bombas liberaron energía por fisión de ^{235}U la primera y ^{239}Pu la segunda. Las energías liberadas fueron equivalentes a 16.000 y 25.000 toneladas de TNT respectivamente, valores comparativamente menores que los involucrados en grandes catástrofes naturales (ver Cuadro 1-3). El artefacto más potente detonado por los seres humanos fue la llamada *bomba del Zar*, explotada por la Unión Soviética en 1961 y que liberó más de 50 millones de toneladas de TNT. Aun estos niveles son mucho menores que los liberados en uno de los eventos más catastróficos de la historia del planeta, el impacto de un meteorito en la península de Yucatán, México (ver Sección 1.12 y Tabla 1.2). La *bomba del Zar* era un artefacto de tres capas, un núcleo de fisión de uranio, que al explotar detonaba una bomba de fusión, la que a su vez hacía estallar una segunda bomba de fisión.

Las centrales nucleoelectricas construidas por los seres humanos, como Atucha y Embalse, generan energía por fisión. A diferencia de las bombas atómicas, en estos reactores nucleares se restringe cuidadosamente la disponibilidad de neutrones,

y con ello se produce la liberación controlada de la energía, sin explosiones. La búsqueda para aprovechar la posible fusión de átomos livianos como fuente de energía para uso humano hasta ahora no ha fructificado. Se han podido llevar a cabo experimentos en el laboratorio de fusión nuclear controlada (no explosiva), pero solo durante tiempos muy cortos; la máxima duración de un pulso de energía de fusión se logró en el proyecto ITER en 2021 y fue de 5 segundos.

ITER (*"The Way"* en latín) es uno de los proyectos energéticos más ambiciosos del mundo actual. Se lleva a cabo en el sur de Francia, donde 35 países están colaborando para construir el tokamak más grande del mundo (un dispositivo de fusión magnética que ha sido diseñado para demostrar la viabilidad de la fusión como una fuente de energía a gran escala y libre de carbono basada en el mismo principio que alimenta nuestro Sol y las estrellas). Este proyecto permite avanzar a la ciencia de la fusión preparando el camino para las plantas de energía de fusión del mañana. Será el primer dispositivo de fusión para producir energía neta; que mantenga la fusión durante largos períodos de tiempo; y, que pruebe las tecnologías integradas, los materiales y los regímenes físicos necesarios para la producción comercial de electricidad basada en fusión.

Con una idea surgida en 1985, los miembros de ITER —China, la Unión Europea, India, Japón, Corea, Rusia y Estados Unidos— ahora participan en una colaboración de 35 años para construir y operar este dispositivo experimental, y juntos llevan la fusión al punto donde se podrá contar con un prototipo de reactor de fusión.

Cuadro 1-5**Un reactor nuclear de fisión natural (no antrópico)**

Hace unos dos mil millones de años, en lo que es hoy Gabón, en el África subsahariana, se dieron las

condiciones naturales para que la reacción de fisión del ^{235}U tuviera lugar en forma controlada, en depósitos de minerales de uranio.

Para ello era necesario tener depósitos de minerales de uranio adecuadamente extensos, y con un contenido del isótopo fisionable ^{235}U alto, superior a los que tienen actualmente los minerales de uranio. La evidencia científica demostró que la reacción nuclear generó del orden de 100 kilovatios (0,03% de lo que puede generar Atucha I) durante muchos años, del orden de los cientos de miles de años, con lo que ese reactor natural generó alrededor de 86.000 millones de kilovatios hora, magnitud similar a la que generó Atucha I a lo largo de 30 años.

El sol procesa ("quema") del orden de $6,2 \times 10^{14}$ g de hidrógeno por segundo (62.000.000 toneladas por segundo). Del orden del 7 por mil de ese valor se liberan en forma de energía radiante, $3,8 \times 10^{26}$ W, aprovechando la equivalencia entre masa y energía, según la famosa ecuación de Einstein (c es la velocidad de la luz):

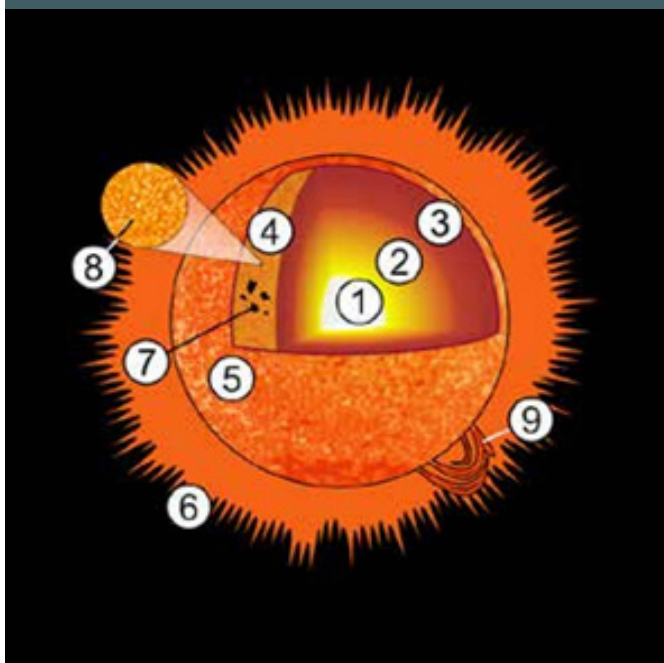
$$E = mc^2$$

Este valor de energía es casi 10^{14} veces mayor que la energía liberada desde el interior de Tierra por desintegración radioactiva. La energía es emitida desde el interior del Sol en forma de fotones de alta energía. En su recorrido a través del Sol, esos fotones son absorbidos y reemitidos muchas veces, y en cada paso la energía de cada fotón liberado va disminuyendo, de manera que la forma más característica de radiar energía al espacio exterior es como luz visible (para una discusión de la energía electromagnética ver Sección 1.7). La radiación que escapa del Sol proviene de una capa externa llamada fotosfera: esta capa está todavía recubierta de otras capas, más tenues: la cromosfera y la corona, como se muestra en la Figura 1-19. Sin embargo, también emite el llamado viento solar, compuesto por protones, electrones y partículas α ; este viento solar es detenido en el llamado Cinturón de Van Allen, lo que evita su llegada a la superficie terrestre (ver Cuadro 1-6).

Como ya se dijo, el intento de imitar al Sol y generar energía por fusión en nuestro planeta hasta ahora sólo han alcanzado modestos logros (mantener la reacción durante unos pocos segundos). Los informes de 1989 que indicaban haber logrado la llamada fusión fría (sin que sea necesario alcanzar temperaturas elevadas) fueron demostrados falsos por estudios inmediatamente posteriores.

Figura 1-19

Esquema de la estructura del Sol. Tomada de Wikimedia Commons.



1. Núcleo 2. Zona radiactiva 3. Zona convectiva 4. Fotosfera 5. Cromosfera 6. Corona 7. Manchas solares 8. Gránulos 9. Erupción

La radiación enviada desde el Sol al espacio exterior en todas las direcciones es de 60 MW/m^2 en forma de fotones de radiación electromagnética (luz visible, infrarroja, ultravioleta y otras longitudes de onda). A la

Figura 1-20

Variaciones de la constante solar (en W/m^2) entre 1975 y 2005. En amarillo, las fluctuaciones diarias; en rojo las fluctuaciones de los promedios anuales; en verde el índice de erupciones solares; en azul, el número de manchas solares; en violeta, el flujo de radiación de 10,7 cm de longitud de onda. Imagen creada por Robert A. Rohde como parte del proyecto *Global Warming Art*. Ver: CC BY-SA 3.0. Tomado de Wikipedia.

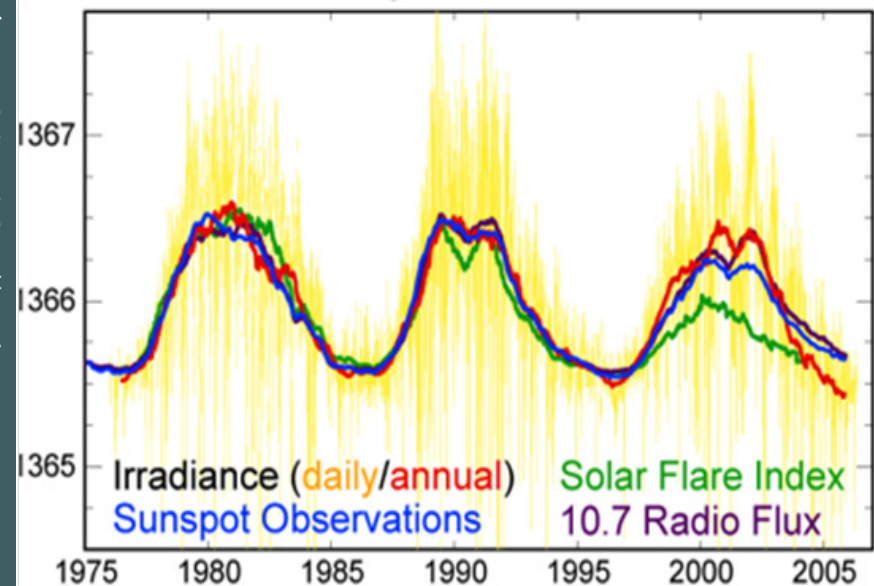
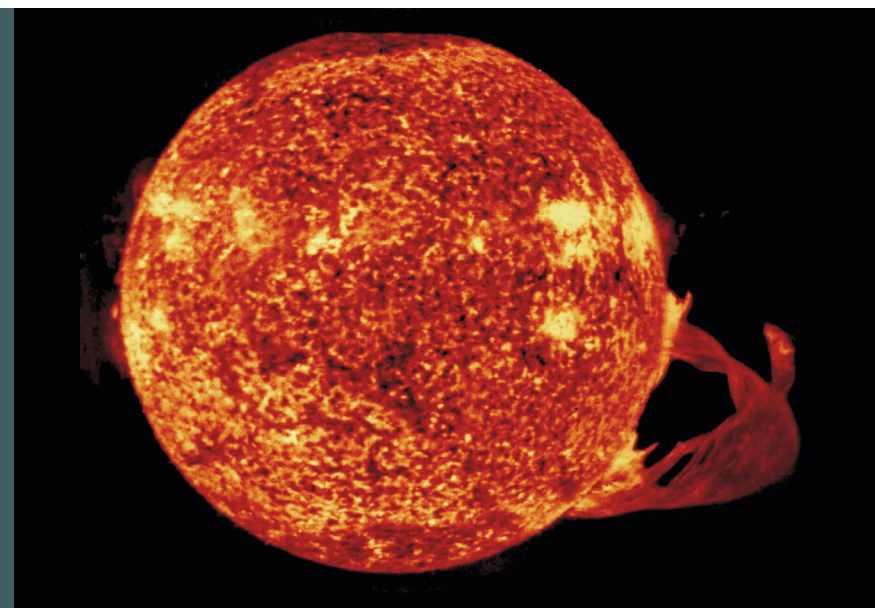


Figura 1-21

Erupción solar. Imagen tomada por el Skylab 4. Tomado de flickr.com.



Capítulo 1

superficie exterior de la atmósfera terrestre llegan $1,37 \text{ kW/m}^2$. Este valor se conoce como constante solar, y sufre pequeñas variaciones a lo largo de los años. La Figura 1-20 muestra que el Sol tiene ciclos de actividad (los más notables en una escala de tiempo corto son del orden de 11 años). Esos cambios cíclicos producen fluctuaciones en la constante solar, del orden del uno por mil.

Si se hace un promedio de la radiación que llega perpendicularmente, y en diversos ángulos, y se tiene en cuenta la zona oscura, se llega a un promedio de 340 W/m^2 (de esta forma, la radiación total que entra en la atmósfera es $1,74 \times 10^{17} \text{ W}$). En la atmósfera esa radiación de $1,37 \text{ kW/m}^2$ es atenuada, y raramente llega a la superficie más de 1 kW/m^2 . Este valor además disminuye a medida que varía la inclinación del sol, y por supuesto es nulo de noche. Una amplia región de la Argentina, que abarca las provincias de Cuyo y del NOA, recibe niveles altos de radiación solar. Allí, la nubosidad es muy baja, lo que aumenta las horas efectivas de recepción de radiación solar directa. Además, la altura conduce a niveles de radiación más altos. Se ha calculado (Haim, 2013) que es posible extraer del orden de $5,6 \text{ kWh}$ de energía por metro cuadrado y por día, lo que equivale a una potencia promedio de $0,23 \text{ kW/m}^2$. La potencia que podría extraerse de un cuadrado de $11,4 \times 11,4 \text{ km}$ en la Puna alcanzaría para duplicar la potencia eléctrica instalada en la Argentina, que en diciembre de 2013 era de $3,14 \times 10^7 \text{ kW}$ (Subgerencia de Planificación Estratégica de CNEA, diciembre de 2013).

Cuadro 1-6

Erupciones (o llamaradas) solares y tormentas geomagnéticas

Las erupciones solares son gigantescos fenómenos de liberación de energía que tienen lugar en la fotosfera y atraviesan la cromosfera y la corona solar. La Figura 1-21 muestra una erupción solar registrada por la NASA el 19 de diciembre de 1973. La extensión de la llamarada es del orden de 500.000 km (recordar que el diámetro de la Tierra no llega

a 13.000 km). Estos fenómenos son causados por perturbaciones magnéticas en el interior del Sol, asociadas con la rotación del Sol alrededor de su eje, que tiene un ciclo de entre 25 y 36 días en la fotosfera.

Estas erupciones a veces van acompañadas de lo que se ha dado en llamar eyecciones de masa coronal (CME, en inglés), y ello produce un fuerte incremento en el viento solar. La Tierra posee un campo magnético, generado por el movimiento de las aleaciones de hierro líquidas que componen el núcleo exterior. Los campos magnéticos poseen la capacidad de interactuar con las partículas con carga eléctrica que ingresan en el mismo. Por ese motivo, el campo magnético terrestre se constituye en un escudo para frenar y desviar las partículas cargadas de alta energía que llegan con el viento solar, como protones e iones más pesados. Ello ocurre en la región del campo magnético terrestre conocido como magnetosfera, que se extiende en las regiones más allá de la termosfera (o ionosfera) (ver Figura 1-7). Dentro de la magnetosfera las partículas cargadas son atrapadas y se mueven en una región llamada cinturón de Van Allen.

La magnetosfera se perturba temporalmente por acción de una onda de viento solar, como la que puede causar una erupción solar con eyección de masa coronal. Esas perturbaciones pueden ser importantes en caso de eventos extremos. Si bien en principio esas perturbaciones no influyen mucho en forma directa sobre la salud humana, en el actual Antropoceno (ver Capítulo 4) una tormenta geomagnética puede tener consecuencias muy serias sobre las redes de distribución de electricidad y sobre las comunicaciones. Es cita obligada el colapso de la red de la compañía Hydro-Quebec de Canadá provocada por la tormenta geomagnética que tuvo lugar en marzo de 1989, y que dejó sin electricidad a millones de personas durante nueve horas. No debe extrañar entonces que sean motivo de análisis las posibles consecuencias de eventos más energéticos que, si bien ocurren con muy baja frecuencia,

podrían tener consecuencias devastadoras. Por efecto dominó, la caída de la red eléctrica podría causar en pocas horas la pérdida del agua potable de red, en menos de un día la pérdida de alimentos perecederos y medicinas, y en más largo plazo los teléfonos, etc. Los efectos podrían durar años, y las pérdidas económicas superar ampliamente las causadas, por ejemplo, por el huracán Katrina (National Academy of Science 2008).

Las tormentas geomagnéticas también pueden afectar severamente las comunicaciones, en particular las de larga distancia que usan ondas de radio. Estas ondas (ver sección 1.7 y Figura 1-24) se reflejan en la ionosfera, y ello les permite unir puntos lejanos, como se muestra en la Figura 1-22. Las perturbaciones en la ionosfera afectan entonces la transmisión de las señales. También se ven afectados dispositivos como los GPS y los sistemas de control de vuelo de los aviones.

Figura 1-22.

Comunicación a distancia con ondas de radio.

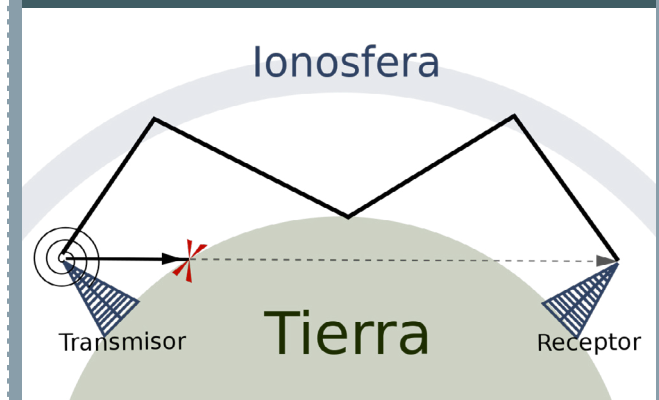
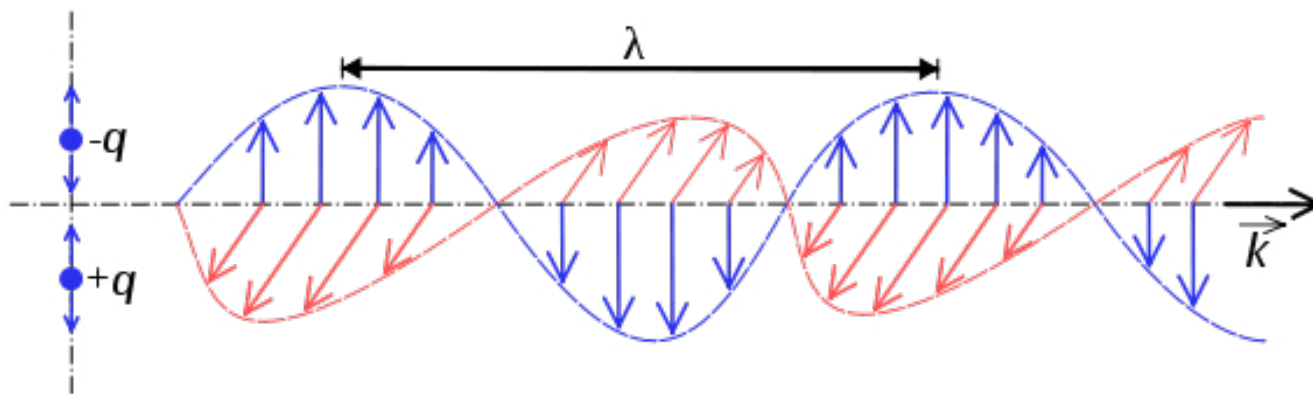


Figura 1-23

Radiación electromagnética

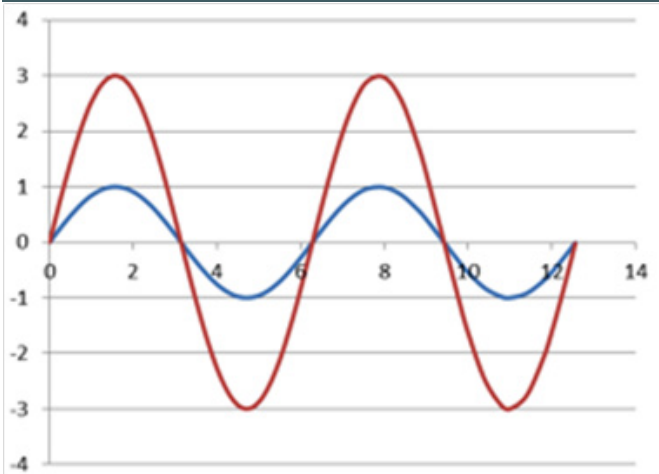


electromagnética, de muy pequeña longitud de onda. Son producidos por los cuerpos más calientes y energéticos del universo, como las estrellas de neutrones y los púlsares, las explosiones de supernovas y las regiones alrededor de los agujeros negros. En la Tierra, se generan por explosiones nucleares, rayos y la desintegración radiactiva. El parámetro radiológico ambiental "gamma total" forma parte de la gestión ambiental.

La radiación electromagnética puede describirse como una perturbación que se propaga en el espacio, caracterizada por un vector eléctrico E y uno magnético B, perpendiculares a la dirección de propagación k, como se muestra en la Figura 1-23.

Figura 1-24

Dos ondas de intensidad y energía distintas, pero de la misma longitud de onda

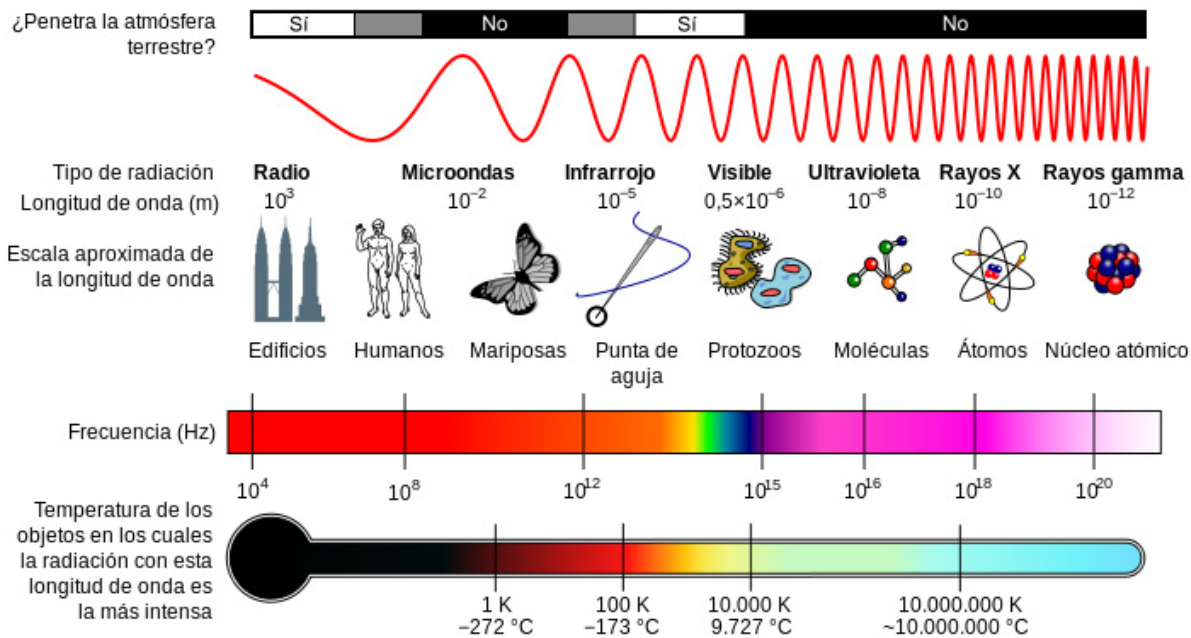


1.7. Radiación electromagnética

Tanto en el Sol como en el interior de la Tierra, los fenómenos nucleares generan energía en forma de rayos γ. Estos rayos son una forma de radiación

Figura 1-25

El espectro electromagnético, Tomado de Wikimedia Commons.



Capítulo 1

Una magnitud fundamental para caracterizar a la radiación electromagnética es la longitud de onda λ (medida en cm), o lo que es equivalente, su frecuencia n (medida en s^{-1}). Ambas magnitudes son inversamente proporcionales; la constante de proporcionalidad es la velocidad de la luz c (medida en cm/s):

$$n = c / \lambda$$

La intensidad de la luz, como la intensidad del sonido o de cualquier fenómeno ondulatorio, es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda. La Figura 1-24 muestra dos ondas de la misma longitud pero de amplitudes distintas; la curva en rojo tiene una amplitud tres veces mayor, y por lo tanto su intensidad es nueve veces mayor. La intensidad no es más que la energía que se transmite por unidad de área y unidad de tiempo.

El espectro electromagnético es el conjunto de radiaciones cuyas longitudes de onda van desde menos de 10-13 cm, hasta más de 1 km. La Figura 1-25 muestra el espectro electromagnético.

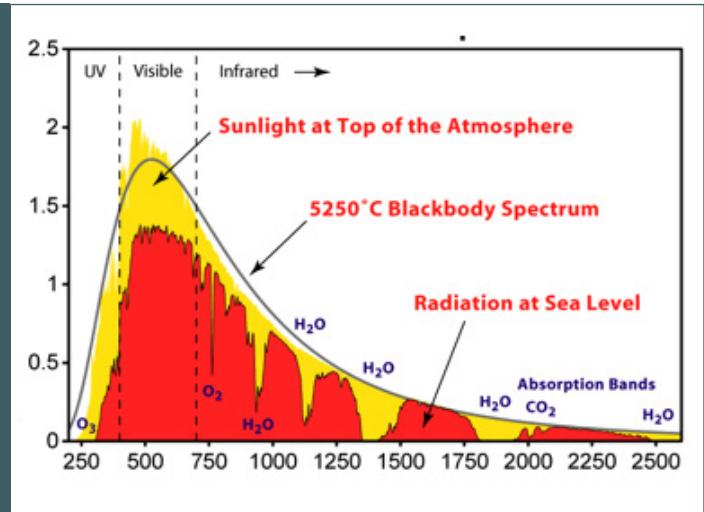
Si bien la radiación electromagnética es una onda que se propaga, también tiene características de partículas. Esas partículas son los fotones, y es posible ver a la energía electromagnética como paquetes de fotones que viajan. La energía E de un fotón es proporcional a la frecuencia (o inversamente proporcional a la longitud de onda); la constante de proporcionalidad es la constante de Planck, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J s:

$$E = hn = h(c / \lambda)$$

Si bien la radiación electromagnética es una onda que se propaga, también tiene características de partículas. Esas partículas son los fotones, y es posible ver a la energía electromagnética como paquetes de fotones que viajan. La energía E de un fotón es proporcional a la frecuencia (o inversamente proporcional a la longitud de onda); la constante de proporcionalidad es la constante de Planck, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J s:

Figura 1-26

Espectro solar. El eje vertical muestra la cantidad de energía que llega de cada longitud de onda por unidad de superficie (irradiancia espectral, en vatios por centímetro cuadrado para cada longitud de onda). El eje horizontal muestra la longitud de onda, en nanómetros. En amarillo, lo que llega a la parte superior de la atmósfera; en rojo, lo que llega a la superficie terrestre. La diferencia corresponde a lo que se absorbe en la atmósfera, por el ozono en el ultravioleta, y por el agua (y en menor medida otros gases efecto invernadero) de la troposfera en el infrarrojo. La curva en negro corresponde a un modelo físico, la energía irradiada por un cuerpo ("cuerpo negro") calentado a 5727°C, o 5600K (ver Sección 1.9). Se han conservado las leyendas en inglés para respetar la figura original. Tomada de Wikimedia Commons.



$$E = hv = h(c / \lambda)$$

La energía total de un haz de radiación (ver Figura 1-25) resulta de multiplicar el número de fotones por la energía de cada fotón, y esta última depende a su vez de la longitud de onda.

Dijimos que en el interior del Sol se producían fotones de muy alta energía, que se van absorbiendo y reemitiendo, hasta que emergían del Sol muy enriquecidos en luz visible. También la atmósfera actúa como filtro de la radiación de alta energía, como veremos más adelante.

La Figura 1-26 muestra el espectro solar, es decir la importancia relativa de la radiación de distintas longitudes de onda que llega a la atmósfera (en amarillo) y a la superficie terrestre (en rojo). Puede apreciarse que la región de menor longitud de onda, las llamadas radiación UV-C y UV-B es filtrada efectivamente por la atmósfera, y a la superficie terrestre solo llega la fracción llamada UV-A del ultravioleta, que es la de menor energía.

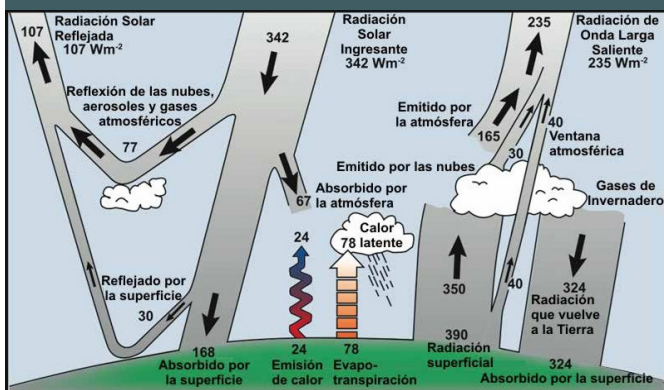
1.8. Balance energético en la Tierra

En total, la potencia que entra en la atmósfera es prácticamente idéntica a la que llega desde el Sol, $1,74 \times 10^{17}$ W. La energía que viene del interior es menos del 0,3 por mil de ese valor. Por supuesto, en superficie, la contribución de la energía geotérmica es mayor.

Para mantener el balance, la Tierra debe reemitir al espacio $1,74 \times 10^{17}$ W. La Figura 1-27 muestra las formas de devolución de la energía al espacio. El 30% es reflejada (se dice que el albedo de la Tierra es 0,3). El resto es absorbido para ser reemitido después; en el proceso, cambia la longitud de onda. Como se dijo, la radiación que llega tiene un importante componente de radiación visible, mientras que la radiación reemitida es puramente radiación infrarroja, de mayor longitud de onda.

Figura 1-27

Balance energético de la Tierra. Adviértase que los flujos de energía están indicados en vatios por metro cuadrado. Tomado de simfruit.cl.



En este balance energético juegan un papel fundamental las llamadas sustancias de efecto invernadero: el agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nítrico, los clorofluorocarbonos y otros gases menores. Las moléculas de estas sustancias, presentes en la atmósfera pueden absorber radiación infrarroja. Por ejemplo, en la Figura 1-27 se ve claramente cómo el agua filtra algunas porciones de la radiación infrarroja que llega del sol. A la inversa, la radiación infrarroja que es devuelta por la superficie hacia la atmósfera también puede ser absorbida por estas sustancias. De allí que el 15% de esa radiación no escape de la atmósfera. Si aumenta la cantidad de gases efecto invernadero, aumenta la cantidad de radiación que no puede escapar, y, en la jerga de la meteorología, aumenta el forzante radiativo (radiative forcing, en inglés), que es la diferencia entre la energía que entra y la que sale de la atmósfera. Ese pequeño desbalance es fundamental para generar fenómenos meteorológicos extremos, tales como tormentas muy fuertes, sequías, inundaciones, etc. En la actualidad no hay dudas que esta acción antrópica está influyendo en el llamado Cambio Climático Global (ver Capítulo 4).

No solo los gases que absorben radiación infrarroja afectan el balance energético de la atmósfera. También

juegan un papel importante otros fenómenos:

- El *albedo*, que mide la capacidad de reflejar la luz. El albedo está muy influido por la reflexión de luz por los mares, y también por las nubes.
- El *material particulado* suspendido en la atmósfera. Las partículas no absorben la radiación, pero la *dispersan*, cambiando su dirección. Con ello, el camino que atraviesa la luz se vuelve mucho más tortuosos, y eventualmente puede ser absorbida mejor.
- Los cambios en la irradiancia del Sol.

Este tema se retoma en el Capítulo 2.

Cuadro 1-7

Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales son fenómenos meteorológicos en los que se disipa una gran cantidad de energía. Esta energía proviene del calor liberado por vapor de agua que se condensa formando agua líquida (ver Capítulo 2); como la evaporación de agua en gran escala ocurre en el mar, los ciclones se originan en este, y pierden fuerza a medida que ingresan sobre tierra firme. La evaporación se alimenta de la energía solar, que es la fuente última de alimentación de esta gran máquina térmica que es un ciclón. La estructura típica del ciclón tiene un ojo central cuya periferia contiene aire cálido y por lo tanto poco denso (la presión en el ojo del ciclón es muy baja) que va subiendo en forma arremolinada. Por el centro del ojo baja aire frío y seco que se va calentando, y contribuye a la circulación.

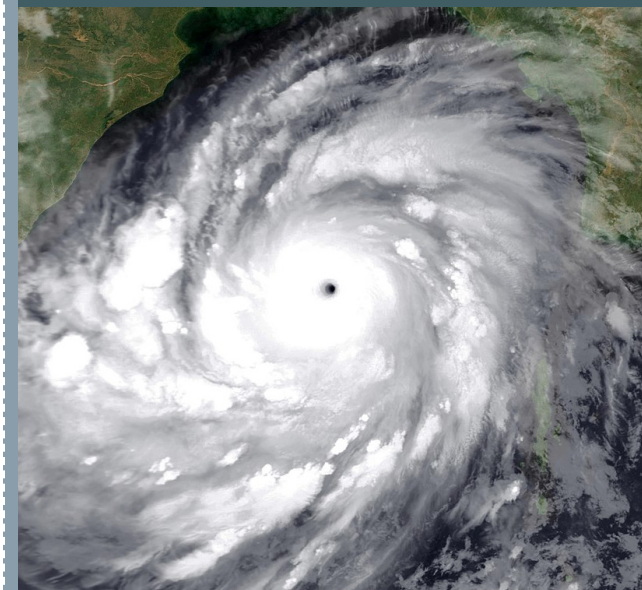
El aire caliente que asciende, al irse alejando del ojo genera más condensación de agua en las capas más frías y ricas en humedad. Este fenómeno a su vez genera una circulación de aire, de forma que el aire húmedo y denso entra en el ojo por la parte inferior, al tiempo que descarga lluvias intensas. El aire ahora seco se dilata por el calor, generando en el ojo del ciclón un centro de baja presión. Esta circulación del aire genera vientos que, por acción de

la rotación terrestre determina la estructura circular típica de los ciclones. Se puede resumir diciendo que la energía solar alimenta una máquina térmica, evaporando agua que después se condensa. Esa energía, en la atmósfera, se acopla con la energía de la gravitación y con la rotación de la Tierra y da origen a una estructura disipativa de la energía, que es el ciclón. Los fuertes vientos y las lluvias intensas de los ciclones más extremos determinan que estos se constituyan en uno de los fenómenos naturales más devastadores. El gran ciclón Bohla que asoló la India y lo que era entonces Pakistán Oriental (hoy Bangladesh) en 1970 causó del orden de 330.000 muertes.

Según la región en la que se desarrolla el ciclón, es llamado por ese nombre, tifón o huracán.

Figura 1-28

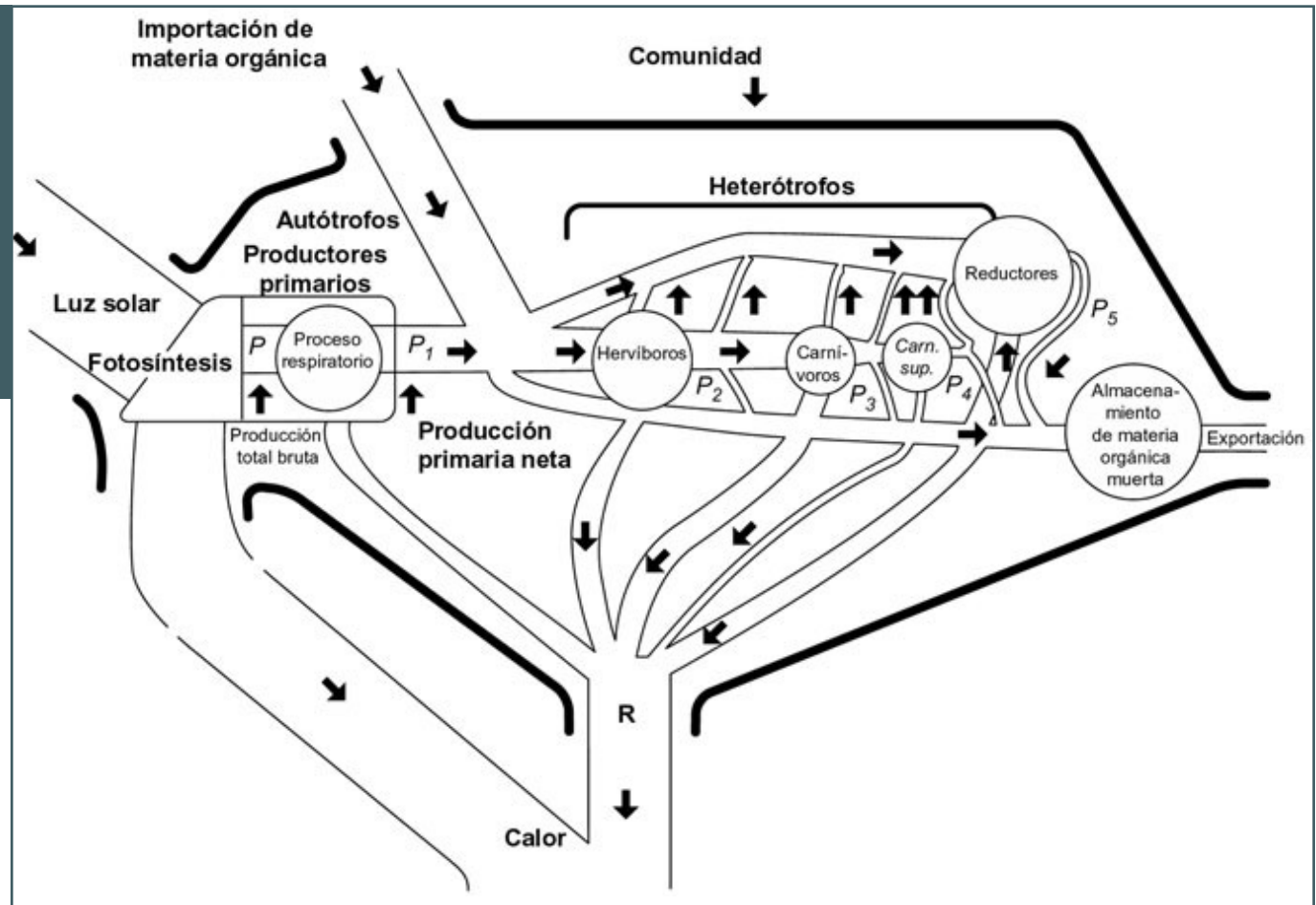
Imagen del ciclón Phailin del 12 de octubre de 2013 que afectara India, Myanmar y Tailandia, afectando a 12.000.000 de personas, y causando 45 muertes. Imagen tomada de ndtv.com.



Capítulo 1

Figura 1-29

Síntesis y transformación de la biomasa, impulsada por la energía solar (tomado de Cicerone y col. 2006)



1.9. La biosfera

La Tierra se caracteriza por la existencia de seres vivos, que han alterado fuertemente las características del planeta. En el Capítulo 3 describiremos en más detalle las características de la vida; aquí nos interesa analizar la relación entre los seres vivos y el planeta en su conjunto. Puede visualizarse a nuestro planeta como una gran máquina, que se alimenta de luz esencialmente visible, la usa para mover el ciclo hidrológico y para producir biomasa, y devuelve la radiación menos útil, que es de mayor longitud de onda, en forma de radiación infrarroja.

Cuadro 1-8

Algunas definiciones ecológicas

En el Capítulo 3 exploramos el tema de la Ecología. Aquí consignamos algunas definiciones de términos usados en este capítulo.

Biosfera es el conjunto de todos los seres vivos y sus relaciones. Puede visualizarse como el conjunto de todos los ecosistemas. Los ecosistemas de una determinada región, que tienen características bien definidas se llaman biomas: por ejemplo, la pampa húmeda, desierto, bosque.

Biomasa es un término que se usa con dos connotaciones distintas. Por un lado, es la densidad de masa de los ecosistemas, y se mide en masa por unidad de superficie (por ejemplo kg/m^2). También se usa el término para designar a la materia de origen biológico que se puede usar para generar energía (por ejemplo, para obtener biocombustibles).

Biota es el conjunto de organismos que habitan una región.

La biosfera toma en última instancia la energía necesaria de la radiación solar. La Figura 28, tomada de Cicerone y col. (2006) muestra a la energía solar como la fuerza impulsora de la generación de biomasa y de sus transformaciones, y al calor como el sumidero de parte de la energía, la que no queda almacenada en la biomasa. La cadena trófica queda entonces definida según la siguiente secuencia:

Productores primarios (organismos fotosintéticos) →

Herbívoros → *Carnívoros* → *Carnívoros superiores*

La actividad biológica importa materia inorgánica en el proceso de fotosíntesis, para lo cual requiere de la energía solar. Las transformaciones sucesivas de la biomasa ocurren a lo largo de la cadena trófica, y finalmente se devuelve materia al medio a través de la descomposición y putrefacción. Todo a lo largo de la cadena trófica también se devuelve materia a través de la respiración y de la eliminación de residuos, y se devuelve energía en forma de calor.

1.10. Los flujos de materia en el planeta

Ya hemos mencionado varios ejemplos de flujos de materia entre diversos reservorios. El ciclo hidrológico (Figura 1-13 y Figura 1-16) es uno de ellos. También mostramos los flujos en la corteza terrestre, en la Figura 1-5. Finalmente, la Figura 1-29 muestra algunos aspectos de los flujos de materia en la biosfera.

En todos estos ejemplos, existe una sustancia o grupo de sustancias que se mueve. La descripción de ese movimiento se realiza definiendo un cierto número de reservorios o compartimentos. En una gran escala, los reservorios son tierra, mar, aire, biosfera. En escalas menores, se deben elegir los reservorios de forma razonable. Los reservorios no son necesariamente realidades físicas; son más bien en general idealizaciones que sirven para simplificar el análisis del problema. Cada reservorio tiene un inventario de la sustancia que nos interesa, medido en unidades de masa (por ejemplo, en kg). Es así que en la Figura 1-13 se eligieron como reservorios del agua a los océanos, a la atmósfera y a lagos y ríos (aguas superficiales), se los representó como cajas (rectángulos) y se indicó dentro de cada recuadro el correspondiente inventario en gramos.

La(s) sustancia(s) que nos interesa(n) se mueve(n) entre esos reservorio. Existe un flujo de materia entre reservorios, que se mide, por ejemplo, en kg/año. Tomando de nuevo la Figura 1-13, los flujos están allí

indicados como flechas, y la magnitud de cada flujo está indicada en gramos por año.

Detrás de un gráfico como el de la Figura 1-13, hay un modelo matemático que está formado por un conjunto de ecuaciones diferenciales (ver Capítulo 6). Tomemos como ejemplo la atmósfera en esa figura. Matemáticamente, el intercambio de agua de la atmósfera con los otros reservorios se escribe así:

$$dm_A / dt = k_O m_O + k_T m_T - k_{A,O} m_A - k_{A,T} m_A$$

En esta ecuación, los subíndices O, T y A representan respectivamente a Océano, Tierra y Atmósfera. Cuando hay dos subíndices, el primero indica el reservorio de origen y el segundo el reservorio receptor. La letra m representa masa, y las letras k son constantes. Las dos primeras describen la probabilidad de transportar agua a la atmósfera, y las últimas dos la probabilidad de remover agua de la atmósfera. Los signos, positivo o negativo, reflejan la entrada y la salida de agua. Al lado izquierdo de la ecuación aparece la derivada de la masa de agua en la atmósfera: es el ritmo al cual cambia el inventario de agua atmosférica. En el Capítulo 6 se puede consultar sobre el significado matemático de las derivadas.

La derivada se mide en las mismas unidades que los flujos, ya que éstos últimos (las flechas) son precisamente los términos que se suman o se restan en el lado derecho de la ecuación.

Para los otros reservorios se escriben ecuaciones análogas de dm_O/dt y dm_T/dt .

Es usual que los inventarios de los reservorios no cambien en el tiempo. Eso significa simplemente que $dm_A/dt = dm_O/dt = dm_T/dt = 0$. Sin embargo, en algunos casos no es estrictamente así, y aparecen pequeños desbalances. Un ejemplo ambientalmente muy importante se advierte en el ciclo que describe el movimiento del carbono entre reservorios; la Figura 1-30 muestra el ciclo del carbono (Blesa y col 2012). Se puede advertir allí que hay un pequeño desbalance en los flujos de carbono hacia y desde la atmósfera. Estamos

describiendo simplemente el aumento observado en el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera. Este tema se discute en detalle en el Capítulo 4. Debe advertirse que este ciclo describe el movimiento del carbono en todas las formas químicas en que aparece: dióxido de carbono, metano, carbonatos, etc. La química del carbono está presente en el Capítulo 2.

Los ciclos mostrados en las Figura 1-13 y Figura 1-30 muestran reservorios que están todos en la llamada zona crítica (ver Sección 1.2). Desde el interior del planeta hay también flujos, que se manifiestan muy especialmente en la actividad volcánica y de fumarolas. El ciclo de la Figura 1-5 también describe intercambio de materia con regiones interiores de la Tierra. En estos casos los flujos son muchísimo más bajos.

1.11. La ley de conservación de la energía

El balance energético del planeta que se muestra en la Figura 1-27 se basa en una suposición fundamental: La conservación de la energía. Existe en Física efectivamente la ley de conservación de la energía, que simplemente dice que la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma de un tipo a otro. ¿Cuáles son los tipos de energía? Por ejemplo, si queremos bombear agua a un tanque, usando un bombeador eléctrico, transformamos energía eléctrica en energía potencial del agua. Cuando en una central hidroeléctrica turbinamos agua, haciendo pasar agua que va cayendo por turbinas, transformamos la energía potencial del agua en energía eléctrica. Cuando calentamos la casa con un calefactor eléctrico, transformamos energía eléctrica en calor; si la estufa es a gas, transformamos energía química en calor. En las usinas nucleoelectricas transformamos energía nuclear en energía eléctrica: a partir del calor generado por una reacción de fisión nuclear se genera vapor de agua el cual impulsa una turbina de vapor que transforma energía térmica en energía mecánica. Ésta, conectada a un generador produce electricidad. En general, en estos procesos de conversión de energía por lo menos una parte, si no la totalidad, se transforma en calor que se disipa la ambiente.

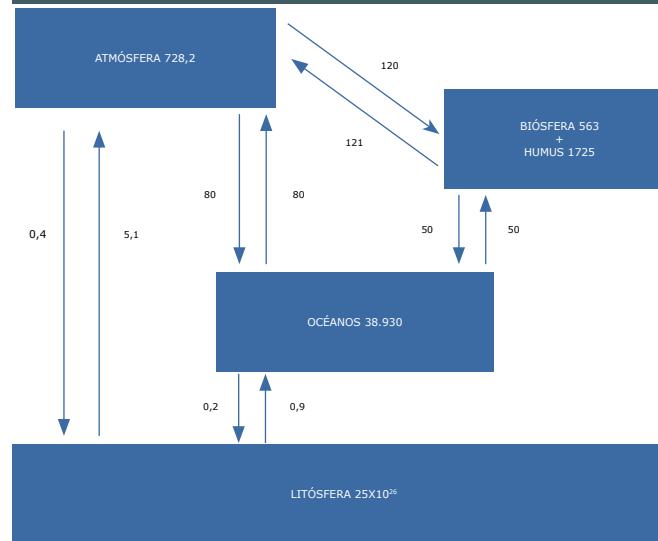
Capítulo 1

Pero, si la energía no se consume, ¿qué quiere decir nuestro “consumo” de electricidad, o de gas? Toda la energía que consumimos se transforma en calor, que se disipa. El calor es una forma especial de energía, menos útil que las otras (desde el punto de vista de su uso para realizar trabajo), y por eso la transformación de otras formas de energía en calor implica una degradación de la utilidad de la misma. Precisamente uno de los problemas que tenemos en esta época es que toda la energía que usamos termina en forma de calor en la atmósfera, y los meteorólogos dicen que la atmósfera queda con energía suficiente como para generar fenómenos extremos como tormentas, huracanes, etc.

Podemos precisar ahora qué es la temperatura. La temperatura de los cuerpos es la magnitud que define la dirección en la cual el calor fluye de uno a otro: siempre lo hace desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. Podemos hacer una analogía con el flujo de agua en un río: el agua siempre se mueve desde lo más alto hacia lo más bajo por la fuerza de la gravedad. Para el calor, la temperatura toma el papel de la altura. Nuestra escala común de medición de temperatura es la escala Celsius, que fija un valor de temperatura de 0°C para el hielo en equilibrio con agua líquida y de 100°C para el agua líquida en equilibrio con su vapor (agua hirviendo). En ciencia, la temperatura se mide en términos absolutos, en kelvins. En esta escala, la temperatura del hielo en equilibrio con agua líquida es 273 K, y la del agua líquida en equilibrio con su vapor es 373 K. Se ve pues que sumando 273 a la temperatura en grados Celsius se obtiene la temperatura absoluta en kelvins. El cero en la escala absoluta (equivalente a -273°C) es la temperatura más baja que puede existir. En EE.UU. se usa aun otra escala, la de Fahrenheit.

Figura 1-30.

El ciclo global del carbono. Las masas de los reservorios están dadas en unidades de 10^{15} g C, y los flujos en 10^{15} g C / año



1.12. Eventos extremos

Los flujos de materia y de energía que hemos descrito sugieren que es posible que lleguen abruptamente a nuestra zona crítica cantidades muy grandes de energía, liberadas de golpe desde el Sol o desde el interior de la Tierra. No sólo energía puede llegar, sino también materia, tanto desde el espacio exterior como desde el interior del planeta. A lo largo de este libro iremos describiendo brevemente eventos tales como erupciones solares, impacto de meteoritos, erupciones volcánicas y terremotos. Estos eventos extremos pueden llegar a disipar potencias muy superiores a la mayor liberada por el hombre, la de la bomba del Zar, descrita en el Cuadro 1-4.

En una categoría aparte se encuentran los eventos meteorológicos extremos, vinculados con las fluctuaciones del clima. En este caso el origen puede ser natural, pero también hay evidencias que la acción

antrópica puede estar generando una frecuencia e intensidad mayores de eventos como sequías, inundaciones, huracanes, temperaturas extremas, etc. Esta influencia antrópica se describe en el Capítulo 4.

En estos eventos el balance energético puede alterarse momentáneamente, o incluso puede prolongarse en el tiempo. La Tabla 1-2. muestra la liberación de energía en algunos eventos catastróficos; se incluye para poner en contexto algunos valores de fuentes de energía usadas por el hombre. Debe destacarse que el evento más energético indicado, una erupción solar, no ocurre en la Tierra. El Cuadro 1-6 señala los efectos en la Tierra de este fenómeno solar. En cambio, el impacto del meteorito de Chicxulub produjo una extinción masiva de muchas formas de vida (ver Cuadro 4-3).

Frente a la posibilidad de ocurrencia de estos fenómenos, es posible en cierta medida adoptar medidas de precaución, y siempre es posible adoptar medidas paliativas. La magnitud de las consecuencias hace imprescindible desarrollar procedimientos de prevención y mitigación.

Tabla 1-2. Energía puesta en juego en algunos acontecimientos extremosa

Acontecimiento	Energía liberada
Bomba de Hiroshima	$6,4 \times 10^{10}$
Bomba del Zar	2×10^{14}
(Producción anual de electricidad en Argentina en 2014)	$4,9 \times 10^{14}$
Volcán de Krakatoa	$8,4 \times 10^{14}$
1 hora de ciclón tropical	$2,0 \times 10^{15}$
Radiación solar que llega en 1 hora a la Tierra	$2,6 \times 10^{16}$
Terremoto y tsunami Japón 2011	$1,4 \times 10^{18}$
Meteorito de Chicxulub	4×10^{20}
Erupción (o llamarada) solar	6×10^{22}

*En rojo, explosiones atómicas; en azul, información comparativa; en negro, algunos eventos extremos.

La Tabla 1-3. ilustra las cantidades y las consecuencias de los fenómenos extremos. La información está ordenada por décadas, salvo las últimas columnas que consignan información del último quinquenio. En las columnas de fondo celeste se consigna el número de eventos extremos reportados por año durante cada década, y en las columnas de fondo rosa, el número de muertes anuales, causadas por esos eventos extremos.

Puede advertirse que a lo largo de 45 años, los eventos extremos reclamaron entre 50.000 y 100.000 muertes por año. Estos números reflejan la importancia de algunos eventos singularmente mortíferos: el ciclón Bholá que impactó en Bangladesh en 1970 (300.000 muertes), el terremoto Gran Tangshan en China en 1976 (242.000 muertes), sequía en Mozambique en 1981 y en Etiopía en 1983 (106.000 y 451.000 muertes), el ciclón Nargis en Myanmar en 2008 (138.000), y el terremoto y tsunami en Haití 2010 (232.000).

La base de datos consultada no registra el tifón Nina de 1975, que, según otras fuentes, arrojó un número indeterminado de víctimas directas, y otras 170.000 causadas por las inundaciones que siguieron a la ruptura del dique Banquiao en China, que no pudo soportar la excesiva carga hídrica. El origen de la omisión está probablemente asociado con que la ruptura de un dique no es un desastre natural.

Este libro contiene información sobre las bases científicas de estos fenómenos. Queda claro sin embargo que las consecuencias son más devastadoras en áreas densamente pobladas y de escaso desarrollo socio-económico, lo que impide una gestión adecuada de la emergencia, tanto en su fase preventiva como en la de mitigación de los daños. La Gestión de Riesgos es, en el fondo, una faceta más de la Gestión Ambiental, y como tal incorpora dimensiones de las ciencias naturales y de las ciencias sociales. Su descripción cae fuera de los alcances de este libro; el lector interesado puede consultar la bibliografía sobre el tema.

Tabla 1-3. Número anual de eventos extremos y de muertes asociadas, ordenados por décadas y por regiones

Regiones	1970-1979		1980-1989			
	eventos	muertes	eventos	muertes		
Asia y Pacífico	47,2	73084	83,5	14477		
África	11,4	73084	30,6	58728		
Europa	7,6	12565	18,6	737		
Latinoamérica y Caribe	17,4	503	32,1	5049		
Norte América	4,9	12219	14,8	445		
Otros	1,8	259	2,8	245		
Mundo	90,3	55	182,4	79682		
	1990-1999		2000-2009		2010-2014	
	eventos	muertes	eventos	muertes	eventos	muertes
	129,4	36748	183,4	67096	133,2	25203
	48,1	7295	105,3	6195	63,4	2387
	35,1	323	54,7	8061	38,4	491
	51,6	7493	67,6	1921	55,8	47284
	28,3	370	28,2	436	22,6	334
	4,6	310	9,5	240	6,6	65
	297,1	52539	448,7	83950	320	75764
Elaborado con datos de <i>United Nations ESCAP</i> (2014)						

Es lógicamente difícil paliar acontecimientos tales como el impacto de un meteorito de grandes dimensiones, o cambios climáticos extremos. En la historia geológica de la Tierra se registraron episodios de esta índole, que por su magnitud dieron origen a lo que se llama extinciones masivas (ver Figuras 3-25 y 3-26).

Para completar este acápite, mencionemos otro acontecimiento extremo que ocurrió en Gabón, hace dos mil millones de años: una reacción nuclear espontánea (ver Cuadro 1-5).

1.13. Conclusiones

A modo de resumen, la Tabla 1-4 muestra las características más salientes de la Tierra, según informa la NASA ().

La mayoría de las magnitudes indicadas en la Tabla 1.3. ya han sido discutidas. La elipticidad es simplemente la diferencia entre los radios ecuatorial y polar, dividida por el radio polar: mide la desviación de la forma esférica perfecta. La gravedad en superficie es la aceleración que produce la fuerza de gravedad sobre los cuerpos, haciéndolos caer. La velocidad de escape es la mínima velocidad inicial que debe tener un cuerpo lanzado a la atmósfera para poder escapar a la gravedad y alcanzar el espacio exterior. La temperatura de cuerpo negro es la temperatura de la superficie acorde con la radiación que emite, como si fuera un cuerpo negro.

Visto desde el espacio, nuestro planeta es un esferoide que recibe radiación visible del sol y devuelve al espacio radiación infrarroja.

Tabla 1-4. Algunos números sobre el planeta Tierra

Masa	5,9726x10 ²⁴ kg
Volumen	108,321x10 ¹⁰ km ³
Radio ecuatorial	6378,1 km
Radio polar	6356,8 km
Radio volumétrico medio	6371,0 km
Radio del núcleo	3485 km
Elipticidad	0,00335
Densidad media	5514 kg/m ³
Gravedad en superficie	9,798 m/s ²
Velocidad de escape	11,186 km/s
Albedo visual geométrico	0,367
Irradiancia solar	1367,6 W/m ²
Temperatura de cuerpo negro	254,3 K

La transformación de dicha radiación alimenta los ciclos que caracterizan el movimiento de la materia en el planeta, en particular el ciclo hidrológico. La actividad biológica se basa en la absorción de fotones visibles de la luz solar para la fotosíntesis, y esa energía es devuelta en forma de calor (radiación infrarroja) en la degradación de la biomasa. También contribuye al

Capítulo 1

funcionamiento de la máquina que es la superficie del planeta la energía proveniente del interior.

En definitiva, nos alimentamos de energía nuclear: la proveniente del Sol, originada en el fenómeno de fusión nuclear, y la proveniente de las entrañas del planeta, originada en el decaimiento de átomos radiactivos.

1.14. Bibliografía

Blesa M.A., dos Santos Afonso M., Apella M.C. (2012). Agua y Ambiente. Un enfoque desde la Química. EUDEBA. ISBN: 9789502319575.

Camillioni I. (2006). El aire y el agua en nuestro planeta. Colección Ciencia Joven, EUDEBA. ISBN: 9502314679.

Cicerone D.S., Sánchez Proaño P., Reich S. (2006) Contaminación y Medio ambiente. Colección Ciencia Joven, EUDEBA, ISBN: 9502314891.

Comisión Nacional de Energía Atómica (2018). Síntesis del Mercado Eléctrico Mayorista de la República Argentina Año XVIII No 214.

Depetris P.J., Medio Siglo Investigando en la "Zona Crítica". (2014) Ciencia e Investigación Reseñas 2(3), 31-48.

De Xammar Oro J.R. (2014). Grandes Catástrofes Naturales. Ciencia e Investigación 64(4), 5-34. Haim, A. (2013). Proyecciones 11(2), páginas 55-66. Publicación de la Universidad Tecnológica Nacional.

Iriondo, M. (2006). Introducción a la Geología. Editorial Brujas. ISBN: 978-987-591-061-4.

National Academy of Science (2008) *Severe Space Weather Events—Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report*. <http://www.nap.edu/catalog/12507/severe-space-weather-events—understanding-societal-and-economic-impacts>

Rovira M. (2006) El Sol. Colección Ciencia Joven, EUDEBA. ISBN: 9789502315799.

Strahler A. N. (1992) Geología Física. Ediciones Omega, Barcelona. ISBN 84-282-0770-4

United Nations ESCAP (2014). *Statistical Yearbook for Asia and the Pacific 2014*. <http://www.unescap.org/resources/statistical-yearbook-asia-and-pacific-2014>

2. LA DESCRIPCIÓN QUÍMICA DEL MUNDO MATERIAL

2.1. Introducción

La Gestión Ambiental debe encarar, entre otros temas, el problema de la contaminación química. Este Capítulo busca como objetivo de mínima familiarizar a profesionales de ramas lejanas a las ciencias exactas y naturales con la jerga característica de la química, imprescindible para comprender la naturaleza, las propiedades y el comportamiento de los contaminantes químicos. Este objetivo requiere que se presenten de la forma más sencilla posible los principios de la química. Los lectores con formación en esta disciplina podrán prescindir de la lectura de muchas secciones, aunque el enfoque usado puede justificar una lectura rápida. Por contrapartida, para aquellos lectores más alejados de la Química, este Capítulo podrá servir como referencia y guía para lecturas más profundas si sus necesidades profesionales así lo requieren. Se ha elegido un estilo que no evita las repeticiones, con la idea de que familiarizarse con una ciencia totalmente desconocida a veces se beneficia de distintas miradas convergentes aunque algo repetitivas sobre un tema.

La Química nace para sistematizar y ordenar la descripción de nuestro conocimiento sobre el comportamiento del mundo material. La atención se centra muy especialmente en la descripción de las transformaciones de la materia tal como la conocemos por nuestra experiencia cotidiana. Es pues, en esencia, una "ciencia terrestre", una Ciencia Natural; fundamentalmente interesada, en sus comienzos, en el comportamiento de la materia en condiciones no muy extremas de temperatura y de presión, condiciones características de la zona crítica del Planeta Tierra. Posteriormente, la Química explora terrenos más amplios, y además crea nuevas formas de la materia, sustancias que no existen en la naturaleza. En este capítulo nos interesa, por un lado, la descripción química del mundo material no afectado por la intervención humana, y por otro, el comportamiento de las sustancias que sintetiza el hombre, cuando las

mismas son descargadas al ambiente.

2.2. La descripción de la materia

Una simple inspección a nuestro alrededor nos muestra que la materia se presenta en una variedad inmensa de formas, que van desde los gases atmosféricos, hasta los minerales y rocas, pasando por el agua y sus soluciones, y otros líquidos como los combustibles fósiles. Son especialmente complejas las formas biológicas de la materia, ya desde los microorganismos y hasta los animales superiores como los mamíferos.

El primer logro en los intentos de describir esa materia con leyes generales simples y abarcadoras, fue la formulación del Principio de conservación de la materia, que establece que la materia puede transformarse, pero no se puede crear ni puede desaparecer. Este principio fue usado como guía por Lavoisier en el Siglo XVI, quien siguió con una balanza la evolución del peso de un sistema cerrado² en el cual tiene lugar una transformación química. Suponiendo que el peso mide la cantidad de materia, pudo demostrar el cumplimiento de este principio en una serie de experimentos.

2. Un sistema cerrado no intercambia materia con el medio ambiente: un recipiente herméticamente cerrado, con su contenido, es el ejemplo típico de un sistema cerrado.

Cuadro 2-1

Peso y Masa

El peso (muchas veces simbolizado w por su nombre en inglés, weight) es la fuerza con la cual la Tierra atrae a los objetos materiales. Esta fuerza, en tanto y cuanto no varíe la gravedad, es proporcional a la masa m , que es la verdadera medida de la cantidad de materia. Un objeto trasladado a la Luna, mantiene su masa, pero su peso varía, porque la gravedad es menor. La aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, vincula peso y masa:

$$w = g \times m$$

Muchas veces hay confusión conceptual porque el peso y la masa se miden ambos en gramos o kilogramos. En la práctica, y mientras nos mantengamos bajo la gravedad terrestre en superficie, la confusión es irrelevante porque el peso de un cuerpo de masa 1 kg es también 1 kg, aunque conceptualmente ambos kilogramos sean unidades distintas.

Cuadro 2-2

Inducción y falsabilidad en ciencias fácticas

¿Cómo se llega a establecer una verdad científica, una ley, una ecuación, una teoría? Normalmente el descubrimiento científico comienza con la observación y la experimentación. De los resultados de estas observaciones y experimentos se deducen leyes y principios generales por inducción: desde los casos particulares comprobados (los experimentos), se pasa a un principio general que sintetiza todas las observaciones realizadas y que se extrapola a casos no observados, aceptando su validez general. Un buen ejemplo lo constituye el principio de conservación de la materia, que se deriva de muchas observaciones en las cuales se cumple, y que se acepta tiene validez general.

Por otra parte, el principio establecido es falsable (término introducido por el filósofo suizo Karl Popper), porque siempre es posible que otro experimento, en otras condiciones, demuestre que el principio no es tan absoluto como se creía originalmente. Normalmente, al establecer los límites de un principio, las condiciones en las cuales ya es falso, el principio es reemplazado por otro más general que contiene al primero como un caso particular. Más adelante veremos que esto ocurrió efectivamente con el principio de conservación de la masa.

Las magnitudes en las ciencias fácticas

Lord Kelvin estableció como principio director de la Ciencia que para poder describir un fenómeno mediante la ciencia debemos poder medir alguna magnitud y expresarla en forma de un número. Las

relaciones entre los números medidos se formulan habitualmente en forma de una ecuación matemática. Es interesante comparar esta fuerte restricción con algunas aproximaciones de las Ciencias Sociales, en las que se definen magnitudes mucho más difíciles de cuantificar (por ejemplo, bienestar humano). El siguiente paso para el establecimiento de la

Química como una Ciencia lo dio Dalton, cuando formuló su Teoría Atómica, más tarde elaborada por Avogadro como Teoría Atómico-Molecular. Esta teoría, como cualquier otra, se basó en observaciones y mediciones experimentales. En el curso de las transformaciones químicas, se conserva no sólo la materia en su totalidad; también se conservan, en forma individual e independiente, las masas de ciertas sustancias, los elementos químicos. Por ejemplo, en la combustión del gas natural, desaparece el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), aparecen agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂), pero se mantienen constantes las masas de carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H). El químico escribe este proceso de la siguiente forma:



Esta forma de escribir la ecuación de la transformación química usa el concepto de átomo y el concepto de molécula.

En definitiva, la Teoría Atómico-Molecular acepta que existen en la naturaleza un número limitado de elementos químicos. Cada elemento está formado por átomos todos idénticos entre sí, y diferentes a los átomos de cualquier otro elemento. Toda la materia, tal como la conocemos, se forma por combinación de esos átomos. En primera instancia, los átomos se unen fuertemente para formar moléculas. Las sustancias químicas puras están formadas por un gran número de moléculas idénticas (por ejemplo, H₂O). A su vez, en la naturaleza, las sustancias puras se encuentran muchas veces asociadas formando mezclas. Por ejemplo, el aire es una mezcla de dióxido (O₂), dinitrógeno (N₂), y cantidades menores de dióxido de carbono (CO₂), agua, argón (Ar) y otros gases.

Figura 2-1.

Tabla Periódica de los elementos químicos. Tomada de Wikipedia. Ver: . La versión actual de la Tabla Periódica según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada se puede consultar en .

Grupo →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18							
↓ Período																									
1	1 H																	2 He							
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne							
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar							
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr							
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe							
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn							
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo							
				Lantánidos							57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
				Actínidos							89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Es útil visualizar a la materia que nos rodea como algo que se construye con una gran caja de Lego, que contiene una variedad limitada, del orden de 90, clases distintas de ladrillos. Esos ladrillos son los átomos, que se combinan para formar moléculas. La variedad de moléculas que se pueden formar es prácticamente infinita. Por ejemplo, combinando unos pocos "ladrillos" de C (carbono) y de H (hidrógeno), podemos formar CH₄ (metano), C₂H₆ (etano), C₂H₄ (etileno), C₂H₂ (acetileno), C₃H₈ (propano), C₆H₆ (benceno), etc. Imagínese el número de moléculas distintas que podemos formar usando 20 ó 30 átomos de carbono, y de allí pensemos en las moléculas biológicas que pueden contener miles de átomos entre C, H, O, N, azufre (S), fósforo (P), cloro (Cl), etc. Si bien no todas las combinaciones imaginables representan sustancias estables, el número de éstas que puede construirse es inmenso.

2.3. Tamaño y forma de los átomos

¿En qué difieren los átomos? Por ejemplo, ¿en qué difiere un átomo de hidrógeno de uno de oxígeno? En la actualidad se sabe que los átomos están formados por un núcleo que tiene carga eléctrica positiva, que ocupa un volumen muy pequeño, y que da cuenta de casi la totalidad de la masa del átomo. Rodeando a ese núcleo se encuentran los electrones, que tienen carga negativa en forma adecuada para compensar la carga positiva del núcleo, y cuya masa es despreciable. Más concretamente, el núcleo contiene protones, de carga +1 y masa aproximada 1, y neutrones, de carga 0 y masa aproximada 1; los electrones tienen carga -1 y masa aproximada 0. Más adelante explicamos cuáles son las unidades de medida en las cuales la carga del protón es unitaria, lo mismo que su masa aproximada. Los átomos de los distintos elementos difieren entre sí en el número de protones que contiene el núcleo; este número es idéntico al número de electrones que orbitan a su alrededor en el átomo neutro. Por ejemplo, el átomo de hidrógeno tiene 1 protón y 1 electrón, y su

masa es pues 1, en esas unidades de masa atómica. El átomo de oxígeno tiene 8 protones y 8 electrones, y en su variedad más abundante tiene también 8 neutrones. Su masa relativa es entonces 16 (es 16 veces más pesado que el átomo de hidrógeno). El átomo más liviano conocido es el de hidrógeno (masa relativa 1), y la masa relativa del más pesado existente en la naturaleza supera 200.

En la actualidad se conoce bien el valor de las masas en gramos de los átomos. Los átomos son extremadamente pequeños. La masa del átomo de hidrógeno es $1,66 \times 10^{-24}$ g; 0,000 000 000 000 000 000 001 66 g. La masa del átomo de oxígeno es 16 veces mayor, la del de azufre es 32 veces mayor, la del uranio que alimenta los reactores nucleares es 238 veces mayor, etc. Como las masa de los átomos individuales son poco convenientes para manejar en cuentas sencillas si se las expresa en gramos, se usa generalmente la escala relativa, en la que la masa del hidrógeno es 1, la del oxígeno 16, la del azufre 32 y la del uranio recién mencionado es 238. La masa real de cualquier átomo se obtiene multiplicando la masa en la escala de masas atómicas por $1,66 \times 10^{-24}$. Para tener una idea más clara de las dimensiones atómicas, podemos calcular el número de átomos que hay en 1g de hidrógeno: 6,023x10²³, o 602 300 000 000 000 000 000 000. Puede advertirse de inmediato que para tener este mismo número de átomos de oxígeno necesitamos 16 g de oxígeno. Ese número se conoce como número de Avogadro.

La Tabla Periódica de los Elementos contiene la información sobre el número de protones de cada elemento (este número se llama número atómico) y sobre la masa relativa de cada elemento (llamado número de masa). La Figura 2-1 muestra una Tabla Periódica, en la que cada elemento se ubica en un casillero y se representa por su símbolo, formado por una o dos letras usualmente asociadas con su nombre. Esta Tabla es de mucha utilidad para los químicos porque resume en forma compacta muchas de las propiedades de los elementos³. Este tema puede

3. El año 2019 ha sido declarado por las naciones Unidas Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, porque se cumplen 150 años de su postulación por Dmitri

consultarse en cualquier texto de Química General, por ejemplo en Aldabe y col. 1999.

Mendeleev.

Cuadro 2-3

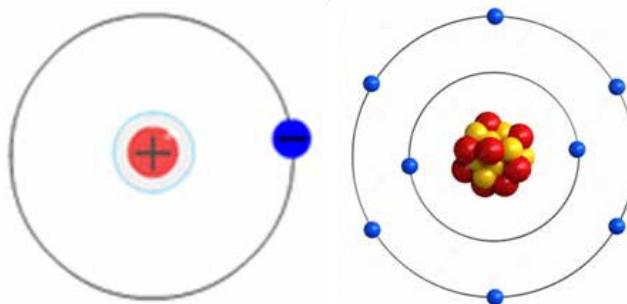
Estructura atómica

En la actualidad, la Física provee un modelo muy sofisticado de los átomos. Las ideas básicas fueron establecidas a principios del siglo XX. Aquí desarrollamos el tema manteniendo un nivel sumamente elemental.

Los átomos están formados por un núcleo, que tiene un volumen muy pequeño pero que contiene casi toda la masa del átomo, y electrones orbitales que se mueven alrededor del núcleo y ocupan la totalidad del volumen característico del átomo. El núcleo a su vez está formado por dos tipos de partículas, los *protones* y los *neutrones*. La Figura 2-2 muestra una imagen de la estructura de los átomos de hidrógeno, con 1 electrón orbital (en azul) y un protón en el núcleo (en rojo), y de oxígeno, con 8 electrones orbitales (en azul), 8 protones (en rojo) y 8 neutrones (en amarillo), en el núcleo. Las dimensiones del núcleo, en comparación con las del átomo, son mucho más chicas de lo que muestra la figura.

Figura 2-2.

El átomo de hidrógeno a la izquierda y el de oxígeno a la derecha.



Las masas de protones y neutrones son parecidas y mucho más grandes que la de los electrones (unas 1840 veces más grandes). Las masas de los átomos están entonces en sus núcleos. Se suele llamar *número de masa (A)* a la suma de los números de protones y de neutrones; A es un número entero. Como la masa de un protón o de un neutrón es muy pequeña, la misma no se suele indicar en gramos, sino en *unidades de masa atómica (uma)*, de modo que la masa de un protón o de un neutrón es próxima a 1 uma. De esta forma, la masa de un átomo es del orden de A umas. La masa atómica se aproxima al número de masa, pero no es un número entero por dos razones: **(a)** la masa del protón es levemente distinta a la del neutrón y ninguna de las dos es exactamente 1 uma; **(b)** cuando existen mezclas de isótopos de diferente número de masa (ver más abajo), la masa atómica es un promedio que tiene en cuenta la abundancia de cada isótopo y su masa.

Los neutrones no tienen carga eléctrica mientras que los protones tienen carga positiva y los electrones carga negativa del mismo valor, pero de signo opuesto. Como los átomos son eléctricamente neutros, el número de protones es igual al número de electrones. Los químicos llaman a ese número *número atómico (Z)*. Es el número atómico el que distingue a los átomos de los distintos elementos: el número atómico del hidrógeno es 1, el del uranio es 92. En medio se ubican todos los elementos usuales.

El número de neutrones presentes en el núcleo no altera apreciablemente la naturaleza química del elemento. Tomando el caso del oxígeno, que tiene 8 protones y 8 electrones, la variedad más abundante es la que contiene 8 neutrones, pero hay también átomos de oxígeno que contienen 9 o 10 neutrones. Las masas de estas tres variedades de oxígeno son distintas, y esas distintas variedades de átomos de un mismo elemento se conocen como isótopos.

Cuadro 2-4

Las cargas eléctricas, la ley de Coulomb y la estructura atómica

El modelo atómico acepta que la materia está formada por partículas que tienen cargas eléctricas. Sabemos que hay dos tipos de cargas, que llamamos positiva y negativa. También sabemos que las cargas de signo opuesto se atraen, mientras que las de igual signo se repelen. La unidad elemental de carga eléctrica es la del electrón (negativa) o del protón (positiva). No puede haber cargas eléctricas más pequeñas. Por ese motivo, se asigna los valores -1 y +1 a esas cargas. Los cuerpos macroscópicos cargados eléctricamente poseen un exceso muy grande de electrones, si están cargados negativamente, o de protones, si están cargados positivamente. La carga eléctrica q es una magnitud fundamental en Física, y se mide en culombios. En esta unidad, la carga de un electrón es $-1,6 \times 10^{-19}$; en otras palabras, necesitamos 6 240 000 000 000 000 electrones para reunir 1 culombio de carga negativa.

El nombre de la unidad proviene de Charles Augustin de Coulomb, quien formulara la ley de atracción o repulsión entre dos cargas q_1 y q_2 , ley que lleva su nombre y que matemáticamente se escribe:

$$F = - (q_1 \times q_2) / d^2$$

En esta ecuación, F es la fuerza de atracción o repulsión, y d es la distancia que separa ambas cargas.

En el átomo existen fuerzas de atracción entre el núcleo y cada uno de los electrones orbitales. A su vez, los electrones se repelen entre sí y se mantienen a la mayor distancia posible. Las razones por las cuales todos los protones pueden coexistir confinados en el núcleo tienen que ver con otro tipo de fuerzas, en la que participan los neutrones, que no discutiremos.

Cuadro 2-5

Elementos químicos y sustancias elementales

Los elementos químicos son los que figuran en la Tabla Periódica, cuya característica fundamental es que no pueden transformarse unos en otros. El número de elementos químicos existentes en la naturaleza es del orden de 80. El hombre ha sintetizado otros, con lo que el número total de elementos químicos conocidos en la actualidad supera el centenar. Los cuatro elementos superpesados sintetizados más recientemente tienen los números atómicos 113 (nihonio), 115 (moscovio), 117 (teneso) y 118 (oganesón).

Las sustancias elementales son aquellas que están formadas por un solo elemento. Las sustancias elementales de los llamados gases nobles (helio y congéneres) están formadas por moléculas monoatómicas: He, Ar, etc. Otras sustancias elementales gaseosas, como hidrógeno, nitrógeno u oxígeno, están formadas por moléculas diatómicas, H_2 , N_2 , O_2 . Es más correcto llamar a estas sustancias *dihidrógeno*, *dinitrógeno* y *dioxígeno*; sin embargo, es práctica común no usar el prefijo di. Cuando decimos oxígeno, es importante saber distinguir si estamos hablando de la sustancia elemental o del elemento.

Las sustancias elementales sólidas, como las de los metales, están formadas por agrupaciones infinitas de átomos, por lo que sus moléculas deberían escribirse por ejemplo, Fe_x . Sin embargo, por convención se escribe simplemente Fe.

2.4. Las moléculas

Ya dijimos que las moléculas están formadas por átomos que se unen entre sí. Cada sustancia química está formada por moléculas idénticas. En realidad, las moléculas más sencillas están formadas por un solo átomo, como en el caso del helio (He) o del argón (Ar), que no tienen prácticamente ninguna capacidad para formar uniones químicas. Las moléculas que contienen

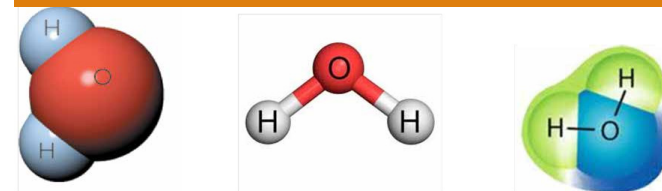
más de un átomo se forman por unión química (llamada unión covalente) entre dichos átomos. Las sustancias gaseosas están formadas en general por moléculas que contienen unos pocos átomos, que pueden ser idénticos o no: hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), etc. Adviértase que los subíndices indican el número de átomos de cada tipo que hay en la molécula; cuando ese subíndice es 1, no se indica. Si queremos indicar que tenemos dos moléculas de dióxido de carbono, escribimos $2 CO_2$.

Las moléculas están definidas no sólo por el número y tipo de átomos de cada elemento que contienen, sino por su forma y su disposición espacial. Las moléculas son cuerpos reales que tienen forma y tamaño característicos. Tomemos como ejemplo dos moléculas triatómicas ya mencionadas: la del agua y la del dióxido de carbono. En ambos casos un átomo central está unido a dos átomos idénticos. En el CO_2 , la molécula es lineal y puede representarse en la jerga química como $O=C=O$. El símbolo = representa un enlace químico doble. En cambio, la molécula de agua es angular, con un ángulo H-O-H de alrededor de 104° (algo mayor que un ángulo recto), como se muestra en la Figura 2-3.

No entraremos a explicar el origen de las diferencias. Sólo interesa darse cuenta que existen muchas formas de combinar los átomos (muchas formas de encastrar los ladrillos), y que todas ellas no son equivalentes.

Figura 2-3.

Algunas formas usuales de representar la molécula de agua



Estas diferencias se vuelven aún más notables cuando existen muchos átomos en la molécula. Las sustancias cuyas moléculas están formadas por los mismos átomos,

en tipo y cantidad, pero están ensambladas de forma distinta, se llaman isómeros. Tomemos como ejemplo uno de los llamados PCB (bifenilos policlorados), el que tiene cuatro átomos de cloro ($C_{10}H_6Cl_4$): el mismo es en realidad un conjunto de sustancias constituido por 42 isómeros distintos (ver Figura 3-15). La familia completa de PCBs está compuesta por más de doscientos compuestos distintos con cantidades variables de átomos de cloro.

Figura 2-4.

Modelos de las moléculas CO_2 , ácido fosfórico (H_3PO_4), ácido acético (CH_3COOH) y el ion carbonato (CO_3^{2-}). En rojo, O; negro, C; celeste o blanco, H.

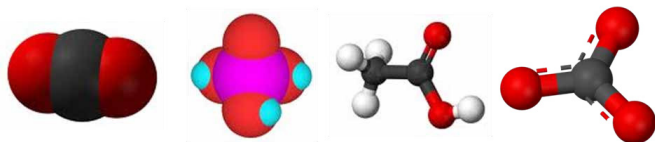
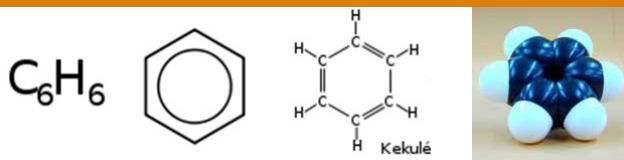


Figura 2-5.

Diversos modos de representar a la molécula de benceno



Cuadro 2-6

Los enlaces químicos

Los enlaces químicos representan las fuerzas que unen a los átomos. En el caso de las moléculas sencillas llamadas covalentes, un enlace simple es un par de electrones compartidos por los dos átomos; un enlace doble está constituido por dos pares de electrones compartidos, y un enlace triple por tres pares de electrones compartidos. Cuanto mayor es el número de electrones compartidos, más fuerte es

Figura 2-6.

El ácido húmico

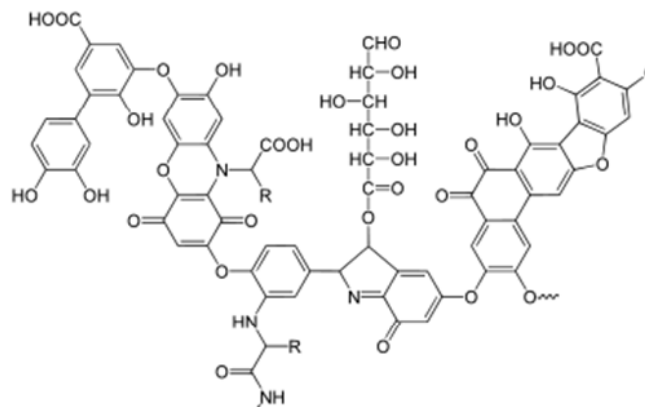


Figura 2-8.

La doble hélice dextrógira del ADN.

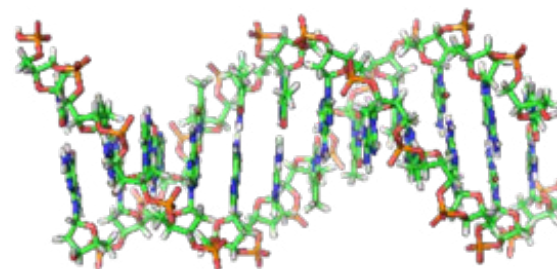
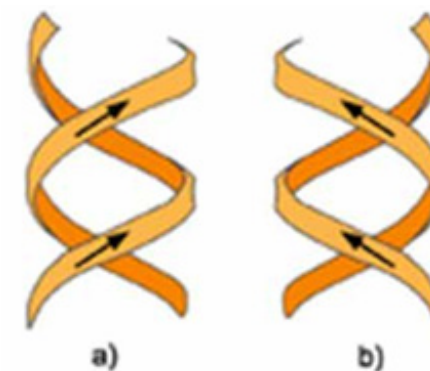
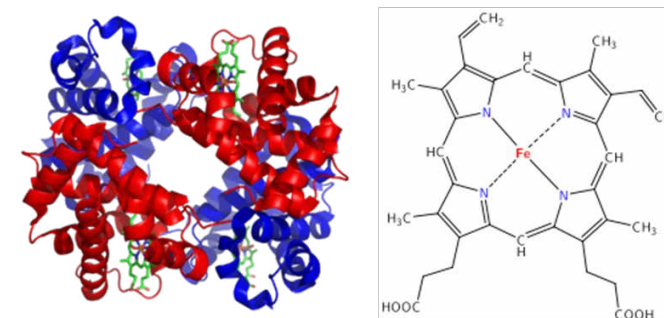


Figura 2-7.

La hemoglobina. A la derecha una versión ampliada del grupo hemo presente en cada una de las cuatro subunidades de la hemoglobina (en verde en la figura de la izquierda).



el enlace.

Existen otros dos tipos de enlace químico. En las sales, como el cloruro de sodio (sal común), el átomo de sodio cedió un electrón al átomo de cloro, con lo cual el sodio queda con carga positiva y el cloro con carga negativa. La atracción entre cargas eléctricas opuestas es lo que mantienen unidos a cloro y sodio. Este tema es tratado más adelante en el texto principal.

En los metales, existe todavía otro tipo de enlace, que no discutiremos.

El lector interesado en ampliar el tema del enlace químico puede consultar la bibliografía recomendada.

Si entramos a considerar moléculas más grandes, como las biológicas, la complejidad puede aumentar muchísimo. En la actualidad es posible determinar en muchos casos la posición de cada uno de los átomos en moléculas tan complejas como una enzima o el ADN (con ciertas limitaciones).

Las Figuras 2-4 a 2-8 muestran algunas moléculas sencillas. También muestran algunos ejemplos de agrupaciones de átomos que tienen un exceso o defecto de electrones. Son los iones que se encuentran en las sales; por ejemplo, el sulfato de amonio está formado iones negativos sulfato, SO_4^{2-} , e iones positivos amonio, NH_4^+ , en relación 1:2 para que la sal no tenga carga neta. Sobre este tema volvemos más adelante.

Cuadro 2-7

Legoquímica

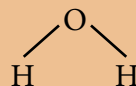
La visión del químico del mundo material es una visión reduccionista, que busca describir la compleja variedad de la materia que nos rodea en términos de múltiples combinaciones de pocos elementos. Se puede hacer una analogía entre el mundo material y una gran caja de Lego (o Rasti, o Mis Ladrillos), que

contienen un número fijo de cada tipo de elemento (ladrillo), con los cuales se pueden construir estructuras tan complejas como la imaginación (y los propios límites de los ladrillos) imponga. Los ladrillos de la caja de Lego son los átomos de los diversos elementos químicos. Existen en la naturaleza alrededor de ochenta elementos distintos⁴: en la caja de Lego tenemos 80 tipos de ladrillos, cada uno de un tamaño, forma, color, etc., diferente. Todos los ladrillos de un mismo tipo son idénticos y no pueden transformarse en otros; sólo pueden combinarse dando origen a las moléculas.

Las instrucciones de la caja de Lego, que indican cómo se puede combinar ladrillos, que muestra ejemplos de estructuras posibles de construir, etc., vienen para los químicos en forma de la *Tabla periódica de los elementos*. Esta Tabla ordena a los átomos disponibles en la naturaleza; para definir el orden, usa las propiedades de los átomos.

Veamos en algunos ejemplos las analogías entre la gran caja de Lego y el mundo material.

1. El agua. En la caja de Lego tenemos ladrillos pequeños, con un encastre que les permite unirse a otro ladrillo; son los átomos de hidrógeno. También tenemos ladrillos más grandes, con dos encastres, que encajan cada uno de forma muy eficiente con los de los átomos de hidrógeno. Son los átomos de oxígeno. Cada átomo de oxígeno puede pues unirse muy fuertemente a dos átomos de hidrógeno, de la forma que ilustra la Figura 2-3. El resultado es, por supuesto, la molécula de agua, que el químico representa como H_2O , o también:



Cada rayita significa un encastre, o una unión química. Las posiciones de encastre en el átomo de oxígeno son tales que la molécula adopta una geometría angular.

4. El hombre ha sintetizado muchos elementos más pesados.

Estas moléculas no tienen posibilidades de encastrar más ladrillos. Ahora bien, imaginemos que en la caja tenemos

1.000.000 de átomos de hidrógeno y también 1.000.000 de átomos de oxígeno (recordemos que la caja es grande o, lo que es lo mismo, los ladrillos son muy pequeños; el mundo material es mucho más grande todavía, o, si se prefiere, los átomos son mucho más diminutos). Con esos ladrillos comenzamos a formar las moléculas de agua. Lógicamente, formaremos 500.000 moléculas, y habremos agotado los átomos de hidrógeno. Quedarán en la caja otros 500.000 átomos de oxígeno sin usar, que podrán combinarse con otros ladrillos, formando otros compuestos. Esta analogía con el mundo real es válida en el Planeta Tierra: una fracción muy elevada del total de los átomos de hidrógeno están combinados con el oxígeno, que está en exceso. El exceso de oxígeno se combina con otros elementos, como silicio, formando SiO_2 (sílice, la base de muchos minerales), CO_2 (dióxido de carbono), CaO (cal viva). Estos dos últimos óxidos a su vez se combinan entre sí para formar el carbonato de calcio, CaCO_3 (piedra caliza, mármol). Ahora bien, dijimos que los átomos de oxígeno son más grandes que los de hidrógeno. Con más precisión, su masa es 16 veces mayor. Eso significa que, en una escala relativa, la masa de un átomo de hidrógeno H es 1, la de un átomo de oxígeno es 16, y la de una molécula de agua H_2O es 18. En gramos, el agua contiene $(16/18) \times 100 = 88,88\%$ de oxígeno y $(2/18) \times 100 = 11,11\%$ de hidrógeno. Puede compararse estos porcentajes con los porcentajes de números de átomos que son, lógicamente, 66,67% átomos de hidrógeno y 33,33% átomos de oxígeno.

2. Las sustancias elementales oxígeno e hidrógeno. Los ladrillos de hidrógeno, que tienen un encastre pueden también combinarse con otros ladrillos idénticos, y, en efecto, si los átomos de hidrógeno no encuentran más que otros átomos de hidrógeno, forman las moléculas H_2 , que también suele escribirse H-H. En forma análoga, el oxígeno, con dos posiciones de unión, forma también moléculas

O_2 , que el químico suele escribir $O=O$, donde la doble raya indica dos uniones químicas. La gran caja de Lego de la Naturaleza contenía originariamente muchas moléculas H_2 , pero las mismas se fueron perdiendo porque, al ser tan pequeñas, las fuerzas gravitatorias no alcanzaban a retenerlas. Nos quedaron en la caja sólo aquellas que alcanzaron a combinarse con el oxígeno para formar agua antes de perderse en el espacio. El hidrógeno combinado como agua fue crucial para la posterior evolución del planeta; la biomasa, que contiene muchos átomos de hidrógeno, los extrajo del agua a través de la fotosíntesis.

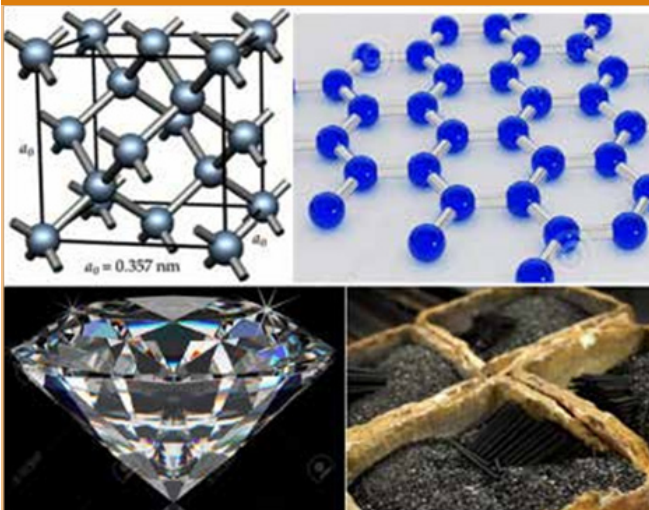
3. El carbono. En la caja de Lego tenemos una buena cantidad de ladrillos de carbono, C. Estos ladrillos tienen cuatro posiciones de encastramiento, y una fuerte tendencia a encastrarse con otros átomos de carbono, con átomos de hidrógeno o con átomos de oxígeno. Vamos a ir analizando cada una de esas posibilidades.

El carbono se presenta en la naturaleza en dos variedades que difieren en la forma de encastrar los átomos: el grafito y el diamante. Tomaremos a este último como ejemplo. Para ello debemos aceptar que las cuatro posiciones de unión (los encastramientos), se disponen con la máxima simetría posible en la superficie de ladrillos esféricos. Es fácil ver cuál es esa disposición. Por simplicidad veamos primero cómo elegir en una circunferencia tres puntos de la forma más simétrica posible. La respuesta es inmediata: esos tres puntos formarán un triángulo equilátero. En una dimensión más, en la superficie de la esfera, cuatro puntos equidistantes entre sí definen un poliedro regular, el tetraedro. Si comenzamos a encastrar estos ladrillos se ve enseguida que podemos encastrar un número indefinido de átomos, como se ilustra en la Figura 2-9 a la izquierda. El diamante es una molécula gigante, donde los encastramientos se extienden, y cada ladrillo está unido a otros cuatro ladrillos que se disponen a su alrededor en un tetraedro. En el grafito, los encastramientos ocurren de otra forma, que se muestra en la Figura 2-9 a

la derecha, formando capas superpuestas y unidas débilmente entre sí: no discutiremos este tema en detalle.

Figura 2-9.

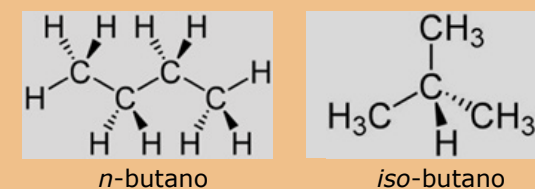
Arriba: Representación de las estructuras del diamante (a la izquierda) y de una lámina de grafito (a la derecha). Abajo: imágenes de un diamante y de grafito.



El dióxido de carbono. Comenzamos a tener algunas dificultades con la analogía. Para unirse al oxígeno, las cuatro posiciones de encastramiento del carbono se agrupan de a dos, que se unen a los encastramientos del oxígeno. El resultado es la molécula CO_2 , $O=C=O$, que en este caso, en contraste con el ejemplo del agua, es lineal. Es más, los átomos de carbono son suficientemente versátiles como para acomodarse a un déficit de átomos de oxígeno. Cuando éstos escasean, se forma el monóxido de carbono, CO , $C\equiv O$. No discutiremos cómo hacen en este caso los átomos para formar tres uniones químicas.

Los hidrocarburos. El comienzo es muy sencillo. El carbono tetraédrico se combina con cuatro átomos de hidrógeno, formando el metano, CH_4 . Los cuatro

átomos de hidrógeno definen un tetraedro, en cuyo centro está el carbono. El metano es el componente principal del gas natural y el hidrocarburo más sencillo. Sin embargo, existen muchas formas de combinar ladrillos de carbono y de hidrógeno, usando diferentes proporciones de ambos y diferentes números totales de átomos. Por ejemplo, con dos átomos de carbono y seis de hidrógeno, puedo formar el etano, C_2H_6 . En este compuesto, cada átomo de carbono está unido a tres átomos de hidrógeno y el encastramiento remanente lo usan para combinarse entre sí. En forma sucinta, H_3C-CH_3 . Si seguimos construyendo moléculas cada vez más grandes, formaremos el propano, $H_3C-CH_2-CH_3$, el butano, $H_3C-CH_2-CH_2-CH_3$, etc. Toda la familia de hidrocarburos saturados se puede describir con la fórmula genérica C_nH_{2n+2} , como se puede corroborar de inmediato con los ejemplos anteriores. La imagen de la caja de Lego es muy útil también para entender qué son los isómeros. Tomemos cuatro ladrillos de carbono y diez ladrillos de hidrógeno y veamos si los podemos combinar de más de una forma. Ya hemos escrito arriba la fórmula del *n*-butano (*n* quiere decir normal, lo que a su vez implica que se forma una cadena lineal de cuatro átomos de carbono). Sin embargo, con la composición C_4H_{10} también podemos formar la molécula de iso-butano, en la cual un átomo de carbono está unido a los otros tres:



La isomería es un fenómeno muy generalizado y de mucha importancia en Química Biológica: las propiedades de las sustancias químicas dependen no sólo del tipo y número de átomos que forman la molécula sino también de la forma en que están dispuestos los átomos a dentro de la molécula.

Existen otros hidrocarburos menos ricos en hidrógeno: las olefinas o alquenos, de composición

C_nH_{2n} (como el etileno C_2H_4), los alquinos como el acetileno C_2H_2 , y los compuestos aromáticos que contienen anillos y cuyo ejemplo más importante es el benceno (ver Figura 2-5).

4. La biomasa. Es posible formar moléculas muy grandes, aprovechando para eso cadenas de átomos de carbono, con muchos átomos de hidrógeno y también con átomos de otros elementos. Los hidratos de carbono tienen moléculas cuya fórmula genérica es $C_nH_{2n}O_n$. Entre ellos están la sacarosa, que tiene seis átomos de carbono en cada molécula ($n = 6$), la glucosa y la fructosa ($n = 5$), la celulosa (n muy grande), el almidón (también n muy grande), etc. Los aminoácidos contienen también átomos de nitrógeno. El aminoácido más sencillo es H_2N-CH_2-COOH (glicina): todos contienen grupos $-NH_2$ y grupos $-COOH$. La condensación de moléculas de aminoácidos, con liberación de agua, conduce a la formación de agrupaciones $-C-NH-CO-C-$, y las sustancias así formadas son las proteínas, que contienen muchos grupos como el señalado, a lo largo de una cadena muy larga. Dentro de las moléculas características de los seres vivos, están todavía los ácidos nucleicos (ADN, etc), que serán analizados en el Capítulo 3.

5. Las sales. Las sales están constituidas por átomos o grupos de átomos con carga eléctrica neta; estos grupos se llaman iones. Los cationes (iones positivos) han perdido uno o más electrones: Na^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , etc. Los aniones (iones negativos) han adquirido electrones en exceso: Cl^- , O^{2-} , CO_3^{2-} , NO_3^- , etc. Los aniones y cationes no tienen posiciones de encaje fijas: acomodan a su alrededor la mayor cantidad de cargas de signo opuesto. Por ejemplo, en la sal común, $NaCl$, cada catión Na^+ tiene a su alrededor seis aniones Cl^- dispuestos regularmente (con ello, los iones cloruro definen un octaedro). Por el tamaño del catión, no caben más aniones a su alrededor. A su vez, alrededor de cada cloruro hay también seis cationes sodio, que definen otro octaedro. Se genera una estructura extendida, y muy regular, característica de los sólidos iónicos, que

se muestra en la Figura 2-10.

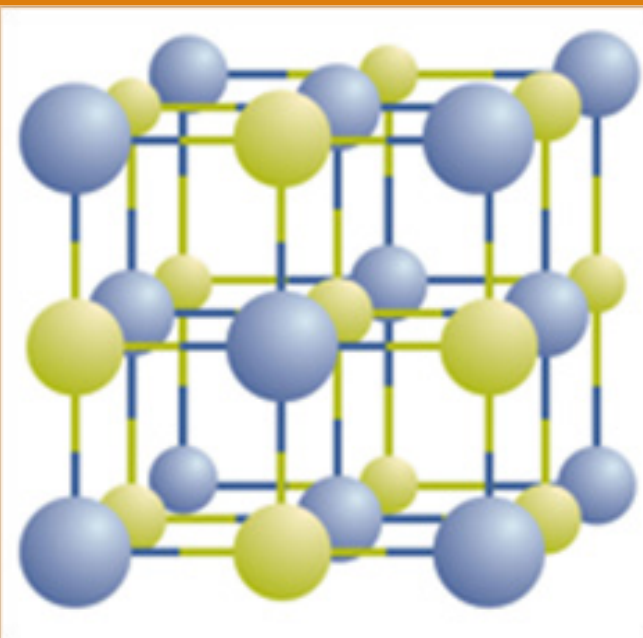
Cuadro 2-8

La nomenclatura química y las moléculas

No siempre es práctico presentar dibujos con la estructura de las sustancias. De allí la importancia de la escritura de las fórmulas químicas. La fórmula de una sustancia busca describir su composición, indicando solamente cuántos átomos de cada clase hay en una

Figura 2-10.

Representación de la estructura del cloruro de sodio. Los aniones Cl^- están representados por las esferas azules, y los cationes Na^+ , más pequeños, por las esferas amarillas.



molécula, sin dar detalles sobre la forma de las moléculas. El procedimiento es sencillo cuando las

moléculas son simples, como en el agua H_2O , o en la glucosa, $C_6H_{12}O_6$. Pero, ¿qué hacer cuando las moléculas son muy grandes, o complejas, como en el cloruro de sodio o en el diamante descrito arriba?

En el caso de los sólidos inorgánicos, es preferible indicar como subíndices números pequeños que nos dicen las cantidades relativas de los diversos átomos en la molécula. Por ejemplo, el cloruro de sodio se representa $NaCl$, porque contiene una relación $Na:Cl = 1:1$; en rigor, la molécula es extremadamente grande, tan grande como un cristalito de sal, lo que podría, aunque no se usa, indicarse como $(NaCl)_\infty$, donde el símbolo ∞ significa "infinito". De la misma forma, el cloruro de calcio es $CaCl_2$, y el sulfato de aluminio es $Al_2(SO_4)_3$. Esta última fórmula indica que por cada dos Al hay tres sulfatos (SO_4). Se ve de inmediato que la relación atómica $Al:S:O$ es $2:3:12$, porque hay 3×4 átomos de oxígeno.

Los polímeros están formados por una cantidad grande de unidades que se repiten. En este caso es común indicar la composición de la unidad que se repite. Por ejemplo, para la celulosa, podemos escribir $(C_6H_{10}O_5)_n$ o $C_{6n}H_{10n}O_{5n}$ donde n es un número muy grande, el número de veces que el grupo $(C_6H_{10}O_5)$ se repite en una molécula.

En el caso de las biomoléculas, a veces se indica la secuencia de aminoácidos que forman una proteína, como por ejemplo $-Gly-Pro-Hyp-$ para indicar la secuencia de aminoácidos en el colágeno (glicina-prolina-hidroxiprolina). Para el ADN, se suele indicar la secuencia de nucleótidos que lo forman, usualmente en segmentos. Por ejemplo: $AAAGTCTGAC$ indica la secuencia de unidades de adenina (A), guanina (G), timina (T) y citosina (C). Ver más detalles en el Capítulo 3.

Cuadro 2-9

Minerales y rocas

En el Capítulo 1, al hablar de la corteza y del manto mencionamos que ambos estaban constituidos esencialmente por aluminosilicatos. Vamos a precisar un poco esta idea. Los dos elementos que predominan en la corteza son el oxígeno y el silicio, y hay otros seis elementos importantes para constituir los compuestos químicos que forman la corteza: aluminio, hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio. Los compuestos químicos que constituyen la corteza se llaman minerales, y en concordancia con los elementos disponibles para formarlos, dichos compuestos son predominantemente el resultado de combinaciones de los respectivos óxidos: el de silicio, (sílice, SiO_2) y el aluminio (alúmina, Al_2O_3) forman la base de los aluminosilicatos, que incorporan también óxidos de los restantes cinco elementos. Los minerales son verdaderos compuestos químicos, de composición y propiedades bien definidas. La composición química no basta para definir a cada mineral, ya que puede haber más de un ordenamiento posible de los átomos en el sólido. Por ejemplo, el carbonato de calcio (CaCO_3) puede ordenarse para dar origen a la calcita o a la aragonita, además de otras variedades.

A diferencia de los minerales, las rocas son mezclas de distintos minerales, de composición variable.

Algunos minerales importantes: corindón (variedad de alúmina); cuarzo (variedad de sílice); calcita (variedad de carbonato de calcio), talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), los feldespatos (un grupo de minerales que son aluminosilicatos de sodio, potasio y calcio), etc. Se conocen más de 5.000 minerales distintos.

Algunas rocas importantes: basalto (roca ígnea formada por enfriamiento de la lava; el principal mineral que contiene es feldespato); granito (roca ígnea formada en el interior de la Tierra por enfriamiento lento del magma; es también rica en

feldespatos); mármol (roca sedimentaria rica en carbonato de calcio).

Figura 2-11.

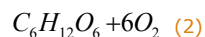
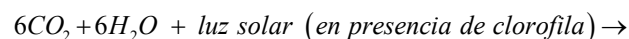
Rocas. De izquierda a derecha: Basalto, granito y mármol. Fuente: <http://edafologia.ugr.es/rocas/basalto.htm>; <https://es.wikipedia.org/wiki/Granito>; <https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1rmol>



2.5. Algunos ejemplos de ecuaciones químicas

Ya hemos visto que en la nomenclatura química una molécula se representa por un conjunto de símbolos correspondientes a los elementos presentes, con subíndices que indican cuántos átomos de cada tipo hay en la molécula. Ahora escribiremos algunas ecuaciones químicas, que representan transformaciones de importancia ambiental. Las primeras estarán equilibradas, para que cumplan con el principio de conservación del número de átomos de cada elemento. Las demás deberán ser equilibradas (balanceadas) por el lector. Nótese que para balancear las ecuaciones buscamos el número de cada tipo de molécula adecuado para el balanceo, pero nunca alteramos la composición de las moléculas (no se pueden cambiar los subíndices que indican el número de átomos en cada molécula).

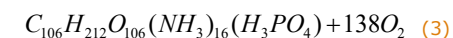
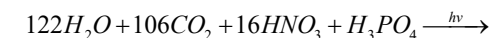
Fotosíntesis:



La ecuación (2) representa el origen del aumento de la biomasa, por aprovechamiento de la luz solar. Se consume dióxido de carbono, se libera oxígeno y se

sintetiza glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). La glucosa no es más que uno de los muchísimos hidratos de carbono existentes en la materia viva, incluyendo la sacarosa, la celulosa y muchos otros. La fórmula general de los hidratos de carbono es $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$. Para la glucosa, $n = 6$, pero para la celulosa, por ejemplo, n es un número muy alto y la molécula es muy grande (en la jerga química, la molécula de celulosa es un polímero, ver Cuadro 2-8). Todo el oxígeno existente en la atmósfera proviene de la fotosíntesis. La atmósfera prebiótica (antes de la aparición de la vida) no contenía O_2 (ni tampoco N_2 que se origina también en procesos biológicos).

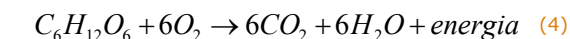
La materia biológica no es simplemente una colección de hidratos de carbono. En la fotosíntesis en realidad se incorporan algunos otros átomos y la ecuación más realista para representar la fotosíntesis es más compleja:



En la ecuación (3) hemos representado la luz como $h\nu$ (ver Capítulo 2).

Combustión de la materia orgánica:

Desde el punto de vista de la transformación química, la ecuación que representa la combustión es la inversa a la de fotosíntesis. Para el caso de la glucosa,

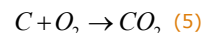


La fotosíntesis capta energía solar y la almacena como energía dentro de las moléculas. El conjunto de los productos de la reacción de fotosíntesis, ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$), es más rico en energía que el conjunto de los reactivos, ($6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$). Esta diferencia se debe a diferencias en las uniones químicas entre los átomos en las moléculas. En condiciones apropiadas, la reacción inversa, la combustión, puede tener lugar espontáneamente, con liberación de calor, o se puede aprovechar la energía que se va liberando, como hacen

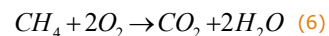
los seres vivos. La fotosíntesis puede ocurrir sólo si se dispone de radiación electromagnética (luz solar) adecuada.

Combustión de combustibles fósiles:

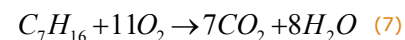
Combustión de carbón:



Combustión de gas natural:



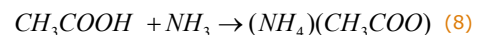
Combustión de un combustible líquido típico:



Neutralización de ácidos con bases:

Son ácidos el vinagre (ácido acético), el ácido cítrico de las frutas, el ácido clorhídrico del jugo gástrico, la vitamina C (ácido ascórbico). Todos tienen en común que contienen un hidrógeno que puede ser cedido a otra molécula como catión H^+ (protón). Son bases el ion carbonato del carbonato de calcio, el amoníaco, la soda cáustica (NaOH), la cal viva (óxido de calcio CaO). Todos tienen en común que pueden aceptar el protón cedido por un ácido.

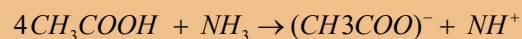
La neutralización de vinagre con amoníaco se escribe de la siguiente forma:



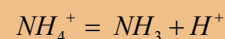
Cuadro 2-10

La escritura de ecuaciones en las que participan iones

Ya mencionamos, y volveremos más adelante con el tema, que los iones son átomos o agrupaciones de átomos que tienen exceso o defecto de electrones, con lo que están cargados eléctricamente, los cationes con carga positiva y los aniones con carga negativa. El bicarbonato de sodio es una sal, formada por el catión Na^+ y por el anión bicarbonato, HCO_3^- . Lo mismo ocurre con el acetato de amonio, que contiene NH_4^+ y CH_3COO^- . En agua los aniones y los cationes se separan al disolverse la sal. Por ese motivo, podemos escribir también la ecuación (8) olvidándonos de los cationes Na^+ , que realmente no participan en la reacción:



Esta forma de escribir las ecuaciones que representan reacciones en solución acuosa es la más frecuentemente encontrada en la literatura. En estas ecuaciones, el número total de cargas netas es igual a ambos lados de la flecha, que es 0 en este caso porque no hay iones en el lado izquierdo; en otros casos puede haber cargas netas en ambos lados de la flecha, como puede verse en la siguiente ecuación:



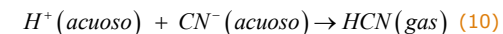
La neutralización de ácidos con bases en agua implica a menudo la reacción entre el protón H^+ proveniente del ácido y el hidróxido OH^- proveniente de la base:



El anión del ácido y el catión de la base quedan disueltos formando una sal. La sal más común, el cloruro de sodio NaCl, resulta de la neutralización del ácido clorhídrico (HCl) con el hidróxido de sodio (NaOH).

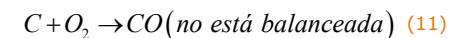
Otras reacciones de interés ambiental:

Formación de cianuro de hidrógeno:

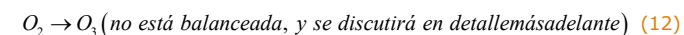


Aquí aclaramos que el cianuro de hidrógeno es gaseoso, y se desprende de la solución acuosa.

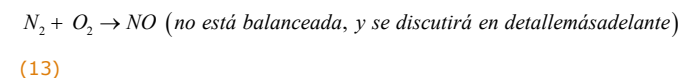
Formación de monóxido de carbono a partir de carbón:



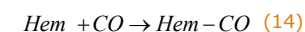
Formación de ozono:



Formación de óxidos de nitrógeno durante la combustión de combustibles líquidos:



Formación de carboxihemoglobina en la sangre:



La hemoglobina es una proteína compleja presente en los glóbulos rojos (es la que le imparte el color rojo a la sangre); para no escribir su compleja fórmula, se la representa simplemente como Hem (ver Figura 2-7).

Los átomos diferentes existentes en la naturaleza se combinan para dar miríadas de moléculas diferentes. Una colección de moléculas todas idénticas constituyen una sustancia pura. En la naturaleza, podemos encontrar muy pocas sustancias puras. El hielo de los glaciares y algunas aguas de pozo son casi puros (H_2O), mientras que el agua de mar contiene cantidades apreciables de cloruro de sodio y otras sustancias. El aire es una mezcla de N_2 , O_2 y otros gases presentes en cantidades menores, y contiene además partículas

sólidas inorgánicas y orgánicas y líquidas suspendidas (aerosoles). Existen yacimientos de sal común casi pura (NaCl), y también existe carbonato de calcio casi puro (CaCO₃). Como se dijo, los minerales son sustancias puras, pero en general se encuentran asociados con otros en las rocas, y se los encuentra puros sólo en pocos casos. El lector interesado en las propiedades físicas y químicas, y en los aspectos morfológicos característicos de cada mineral, puede consultar sitios web como [o](#), entre otros. Por lo demás, la materia que nos rodea en la Tierra se presenta siempre como mezclas sencillas o complejas de distintas sustancias puras.

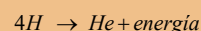
Cuadro 2-11

El reduccionismo y los límites de validez de las leyes físicas

La descripción de la materia responde al enfoque reduccionista de la Ciencia, que busca reducir la descripción de sistemas y fenómenos complejos a un conjunto de sistemas y fenómenos más simples. El enfoque reduccionista, por contraposición al enfoque holístico, ha dado muchos frutos a las Ciencias Físicas y Naturales, ya que ha permitido la formulación de leyes sencillas, expresables en forma de ecuaciones matemáticas. Estas leyes sencillas se cumplen con mucha rigurosidad si el sistema está lo suficientemente simplificado como para que no haya complicaciones o efectos secundarios. Por ejemplo, las leyes de Dalton, de conservación del número de átomos de cada elemento, se cumplen muy bien en casi todas las situaciones cotidianas, aunque dejan de cumplirse cuando las sustancias son radiactivas. Los átomos radiactivos transmutan en otros átomos, con emisión de partículas elementales y/o radiación electromagnética. También la ley de conservación de la materia deja de cumplirse en los fenómenos asociados con las transformaciones nucleares. En la teoría de Einstein, las leyes de conservación de la materia y de la energía (ver Capítulo 2) dejan de cumplirse individualmente, y se acepta que la masa y la energía se pueden manifestar en forma interconvertible, como lo establece cuantitativamente la famosa ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

En esta ecuación c es la velocidad de la luz; la igualdad indica que si desaparece una cierta cantidad de materia Δm (= masa inicial - masa final), aparece una cantidad equivalente de energía ΔE (= energía final - energía inicial). Como c es un número muy grande (aproximadamente 300.000.000 m/s), valores muy pequeños de Δm alcanzan para originar grandes cantidades de energía. Este fenómeno es el que tiene lugar en el Sol, en gran escala, cuando los átomos de hidrógeno transmutan en átomos de helio, como ya se discutió en el Capítulo 1:



2.6. El agua

El agua juega un papel fundamental en la existencia de la vida. La fotosíntesis, ya discutida, usa agua como uno de los reactivos. Los medios biológicos contienen altos porcentajes de agua, y fue en las aguas del océano donde se cree comenzó la vida. Estas notas apuntan a ilustrar algunas de las propiedades del agua, que son las que definen su importancia.

2.6.1. Estructura del agua

El agua está formada por moléculas H₂O. En el vapor de agua, estas moléculas se asocian poco entre sí, y la Figura 2-3 representa bien su estructura. Los electrones no están distribuidos homogéneamente; hay mayor densidad electrónica en la vecindad del átomo de oxígeno, y menor densidad en la región de los átomos de hidrógeno. Queda parcialmente descompensada la carga positiva de los núcleos de hidrógeno y se genera un dipolo eléctrico. La imagen a la derecha de la Figura 2-3 ilustra la idea básica de un dipolo eléctrico, un objeto en el que los centros de las cargas positiva y negativa están separados.

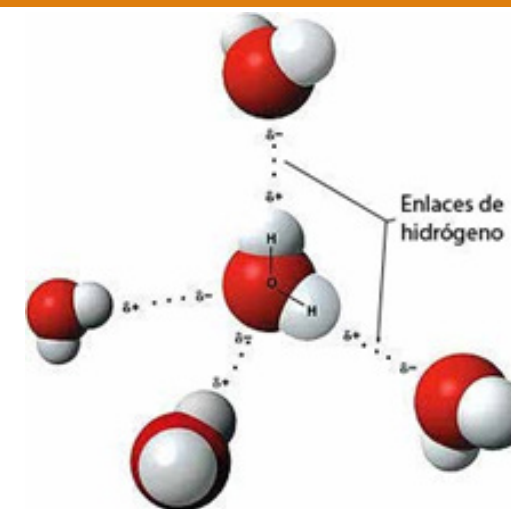
Más adelante veremos que el dipolo de las moléculas juega un papel fundamental en la capacidad que tiene

el agua de disolver sales.

Cuando se acercan dos moléculas de agua, los extremos, positivo de una y negativo de la otra, pueden atraerse. El resultado final es la formación de un enlace más débil, pero importante, que se suele llamar enlace de hidrógeno (o puente hidrógeno), como muestra la Figura 2-12.

Figura 2-12.

La aproximación entre moléculas de agua, y la atracción entre uno de los H y el O de la otra, con formación de enlaces de hidrógeno.

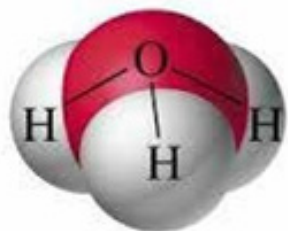


Cuadro 2-12

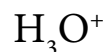
La naturaleza del protón en agua

Cuando un ácido se disuelve en agua, libera iones H⁺. Estos iones pueden formar uniones fuertes con el agua, y por ese motivo muchas veces se encuentra en la bibliografía, en lugar del protón, al ion hidronio, H₃O⁺, que no es más que un protón unido a una molécula de agua, como se muestra en la Figura 2-13.

Figura 2-13.

El ion hidronio H_3O^+ 

Ion hidronio



2.6.2. Propiedades del agua

A presión atmosférica, el agua líquida es estable entre 0 y 100°C (entre 273 y 373 K). No es usual que un compuesto formado por moléculas tan sencillas permanezca en estado líquido en un ámbito tan amplio de temperatura. En el líquido, las moléculas se encuentran en gran proximidad, y ello es posible gracias a los enlaces de hidrógeno.

El agua líquida es un excelente solvente de las sales, que contienen aniones y cationes. La Tabla 2-1 da una lista de algunos cationes (en la primera fila) y de algunos aniones (en la primera columna) usuales. Se ha escrito también las fórmulas de algunas de las sales formadas por combinación de un dado catión con un dado anión; el lector puede completar los casilleros vacíos. Nótese que la carga total de los cationes debe estar compensada por la carga total de los aniones.

El agua es capaz de separar los aniones y cationes de las sales, hidratándolos. Los cationes hidratados contienen el catión rodeado por moléculas de agua, con el átomo de oxígeno (el extremo negativo del dipolo) apuntando hacia el catión. Esta capacidad de disolver se manifiesta muy especialmente cuando la sal contiene aniones y

Cuadro 2-13

El carbonato de calcio en la naturaleza

Ya se mencionó que el mármol es una roca constituida esencialmente por carbonato de calcio. Otras formaciones naturales notables de carbonato de calcio lo constituyen las estalactitas y estalagmitas, que se forman en ambientes en los que se evapora agua saturada con los iones constituyentes del carbonato de calcio, y se va formando la típica estructura que se muestra en la Figura 2-14 a la derecha.

Figura 2-14.

A la izquierda, coral ramificado, uno de los muchos tipos de coral (). A la derecha, estalactitas y estalagmitas ().



Tabla 2-1. Aniones y cationes comunes, y sus sales

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Fe^{2+}	Fe^{3+}	NH_4^+	Al^{3+}
Cl^-	NaCl				FeCl_3		
NO_3^-							
SO_4^{2-}		K_2SO_4					
PO_4^{3-}			$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$				
CH_3COO^-							
S^{2-}							
CO_3^{2-}						$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	
HCO_3^-							

El carbonato de calcio es también el constituyente natural de los exoesqueletos de muchos organismos. El coral no es más que carbonato de calcio de origen biológico. Las playas de Varadero, en Cuba, tienen "arena blanca", que no es más que carbonato de calcio de los moluscos. La acidificación de los océanos (ver 2-18, página 114 y Figura 4-37) afecta la estabilidad de los arrecifes de coral y otras formas biogénicas de carbonato de calcio, ya que la solubilidad del carbonato de calcio aumenta fuertemente cuando aumenta la acidez del agua.

cationes con cargas bajas. En cambio, cuando las cargas de los iones son elevadas, las atracciones entre aniones y cationes son tan fuertes que la hidratación no puede vencerlas.

Por ese motivo el cloruro de sodio es muy soluble, y en cambio el carbonato de calcio, o el fosfato de calcio, son muy poco solubles en agua.

El cloruro de sodio es tan soluble que prácticamente todo se encuentra disuelto en el agua de mar. Las salinas, yacimientos de sal, provienen de antiguos mares que se secaron o se formaron por ciclos de evaporación en terrenos con aguas surgentes ricas en cloruro y sodio

De la misma forma, el carbonato de calcio, CaCO_3 , proviene de las aguas en las cuales se encontraron los iones CO_3^{2-} y Ca^{2+} , que se unieron, formando la sal sólida.

2.7. Las sustancias químicas⁵ fabricadas por el hombre

Desde los comienzos de la humanidad el hombre ha transformado las sustancias químicas del ambiente en otras más útiles para sus fines. Es así que es usual clasificar a la prehistoria en los períodos conocidos como edad de piedra, edad de bronce y edad de hierro, por los materiales inorgánicos que el hombre obtuvo para fabricar herramientas, armas, etc. En paralelo también usó materia de origen biológico, como madera y huesos.

La extracción de sustancias útiles de los minerales comenzó tempranamente, y fue aumentando, como ocurrió por ejemplo con el azufre ya desde la Edad Media (ver Cuadro 2-14).

5. Desde hace ya varios años se ha difundido el uso en español el uso de *químicos* para designar lo que en inglés se llama chemicals. Según la tercera acepción del Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia Española, químico (masculino y femenino) significa especialista en química. En español, por ahora, el equivalente a chemicals es sustancias químicas.

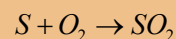
Cuadro 2-14

Historia del Azufre

El azufre elemental S es un sólido amarillo, compuesto por unidades elementales de ocho átomos (S_8), aunque existen variedades con otras estructuras. Los primeros requerimientos de azufre estuvieron vinculados con la fabricación de pólvora, pero el gran auge del azufre estuvo asociado con la revolución industrial, durante el siglo XIX, durante la cual el azufre fue un insumo crítico para la industria química pesada, como el proceso Leblanc de fabricación de carbonato de sodio y en general para la fabricación

de ácido sulfúrico.

El azufre flor se encontró en estado elemental en la naturaleza, asociado con otros minerales como piedra caliza y yeso, principalmente en yacimientos de Sicilia. Allí se desarrolló el proceso de los *calcaroni*, montículos del mineral poco compactado para permitir la circulación del aire. Iniciando un fuego con madera, pronto el propio azufre entraba en combustión:



El calor liberado fundía el resto del azufre, que escurría y era recogido en la base. Una variante a los *calcaroni* fueron los *doppioni*, usados en la región de Romaña, en la Italia central. En estos, el azufre era sublimado (pasado a vapor) en una primera caldera, y de allí transferido a un segundo recipiente, donde condensaba.

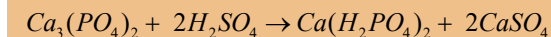
El impacto ambiental del proceso era enorme, porque las dos terceras partes del azufre se liberaba a la atmósfera como dióxido. Recién a fines del siglo XIX (1885) se dictaron regulaciones para impedir el procesamiento de mineral en época en que dañaba seriamente a los cultivos (julio, agosto y septiembre). En Argentina, se extrajo azufre flor en la Mina La Casualidad, en la provincia de Salta, hasta su cierre en 1978.

Con el correr del tiempo los sulfuros metálicos, como la pirita, FeS_2 se constituyeron en la principal fuente de azufre, y España en su principal proveedor. En la actualidad, la principal fuente de azufre es el gas natural, que puede contener tenores importantes de sulfuro de hidrógeno SH_2 .

Para aquellos interesados en la historia del azufre, se recomienda el libro de Kutney (2013).

El principal producto industrial con azufre es el ácido sulfúrico, que se usa en muchos procesos, muy especialmente en la síntesis de fertilizantes,

que consume el 60% de la producción. Con él se fabrica ácido fosfórico, base de la síntesis de muchos fertilizantes, o el superfosfato ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$), obtenido tratando fosfato de calcio con ácido sulfúrico:



También se usa ácido sulfúrico en la industria petroquímica, tratamiento y beneficio de minerales, obtención de pigmentos, detergentes y plásticos.

La gran revolución química comenzó en el siglo XVIII y se extiende hasta nuestros días. Cronológicamente, las primeras industrias químicas buscaron la obtención de sustancias inorgánicas de interés industrial, como el carbonato de sodio (Na_2CO_3), insumo fundamental para fabricar vidrio, jabón y papel, y el ácido sulfúrico, usado en la fabricación de fertilizantes y de una gran variedad de otros productos.

Las industrias químicas transforman materias primas extraídas por el hombre, y por lo tanto se nutren fuertemente de la extracción de petróleo y gas y de la minería metálica y no metálica. Una

clase importante de sustancias sintetizadas son los productos químicos básicos, que se manufacturan en grandes cantidades y se comercializan como *commodities*⁶. Dentro de estos los compuestos inorgánicos más importantes son el ácido sulfúrico y sus derivados, el amoníaco y sus derivados, el cloro y sus derivados, el carbón y varios carbonatos, el ácido nítrico, el ácido fosfórico, el oxígeno y el agua oxigenada, y el dióxido de titanio. Otras *commodities* importantes son los fertilizantes y los plásticos.

Además de los productos químicos básicos, se manufacturan también una gran variedad de sustancias químicas destinadas a:

6. Se denominan *commodities* a productos básicos y genéricos con bajo nivel de diferenciación que se negocian en los mercados mundiales como el Chicago Board of Trade (CBOT). Incluyen a granos y otros productos agrícolas, carnes, petróleo y combustibles fósiles, y productos químicos básicos.

Capítulo 2

- atención de la salud (industria farmacéutica),
- agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas),
- consumo personal y del hogar (productos de limpieza hogareña, artículos de tocador, cosméticos, etc.)
- especialidades químicas (specialties). Son sustancias para un uso determinado y preciso, como catalizadores, recubrimientos, materiales electrónicos, nanomateriales para diversos usos, etc. Tienen mayor valor agregado que los productos químicos básicos y su fabricación implica muchas veces el dominio de tecnologías avanzadas.

En la actualidad una fuente fundamental para la fabricación de sustancias importantes para el hombre es el petróleo. En sentido estricto petróleo es el nombre del líquido compuesto por hidrocarburos que el hombre extrae. En forma más general, incluye a los gases (gas natural) y a los sólidos (bitumen) asociados con el líquido. La Figura 2-15(a) muestra los primeros productos que se extraen del petróleo crudo, y a partir de los cuales se establecen cadenas químicas de producción de otros productos. Las Figuras 2-15(b), 2-16 y 2-17 muestran

Figura 2-15(b).

Cadena química del etileno. Las sustancias en cuadrados son insumos para procesos posteriores, las que figuran en óvalos son productos ofrecidos al consumidor. Adaptado de American Chemistry Council (2018), Elements of Business Chemistry. Ver: <https://www.americanchemistry.com/2018-Elements-of-the-Business-of-Chemistry.pdf>.

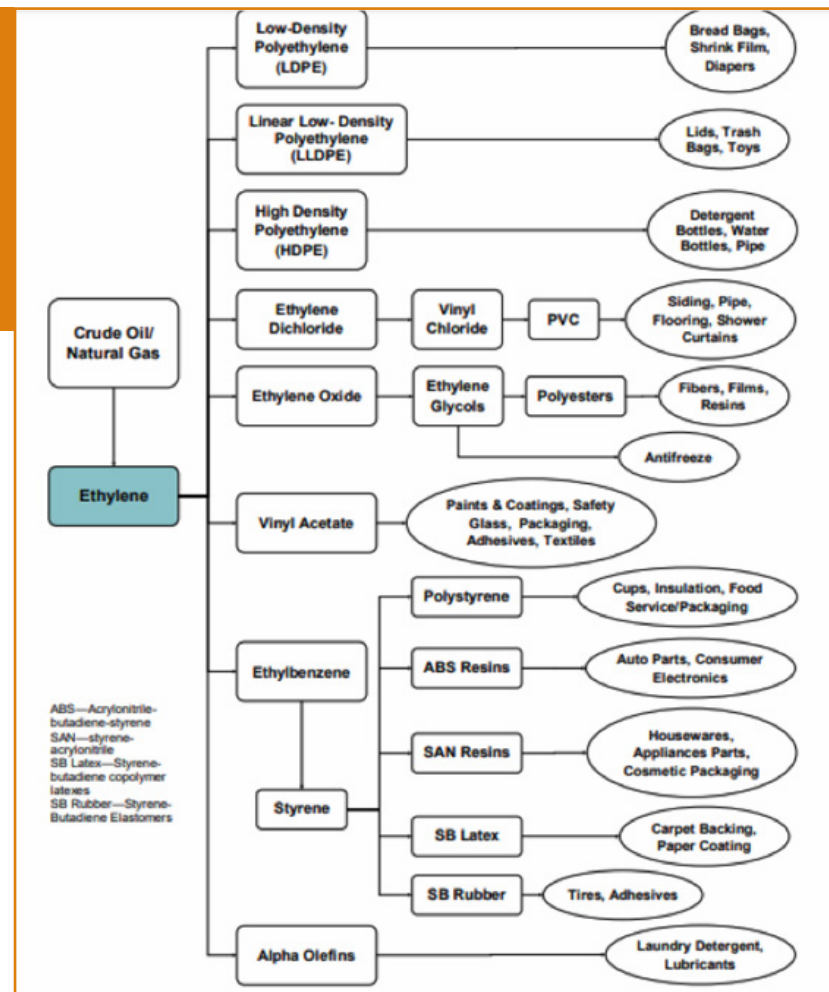
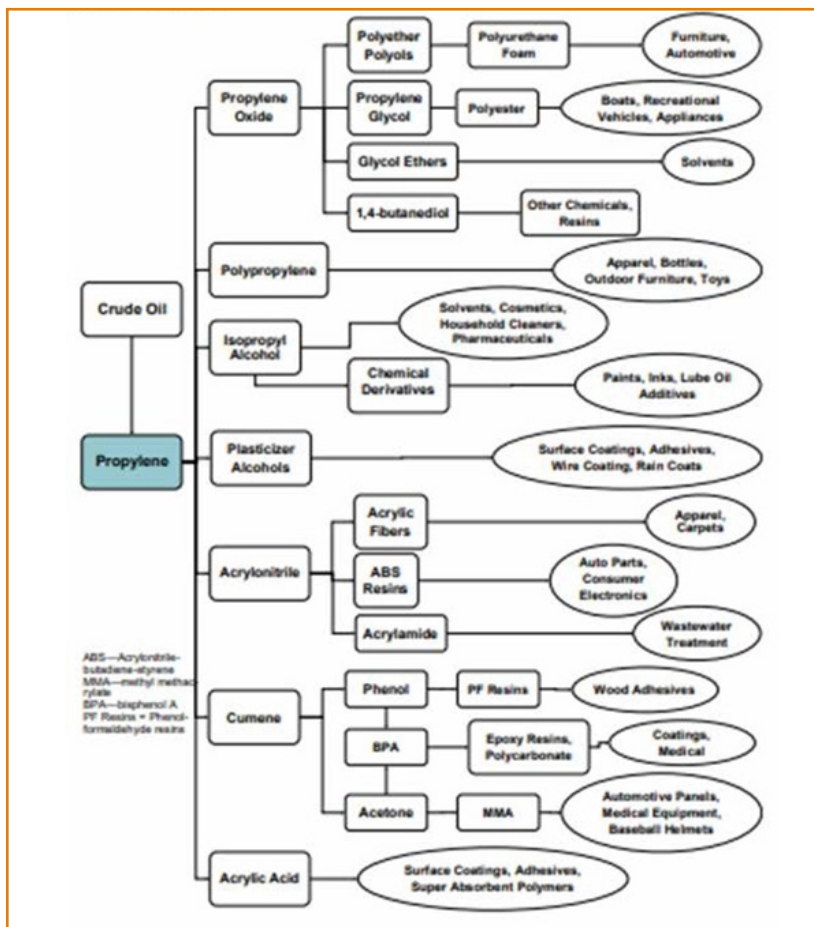


Figura 2-16.

Cadena química del etileno. Las sustancias en cuadrados son insumos para procesos posteriores, las que figuran en óvalos son productos ofrecidos al consumidor. Adaptado de American Chemistry Council (2018), Elements of Business Chemistry. Ver: <https://www.americanchemistry.com/2018-Elements-of-the-Business-of-Chemistry.pdf>.

las cadenas químicas de la producción de derivados a partir de etileno, propileno y los butanos, hidrocarburos de cuatro átomos de carbono. Las sustancias en cuadrados son insumos para procesos posteriores, las que figuran en óvalos son productos ofrecidos al consumidor. En el caso del etileno y del óxido de propileno se indica que los mismos tienen su propia cadena (etileno) o participan en otra cadena (la del propileno).

Cuadro 2-15

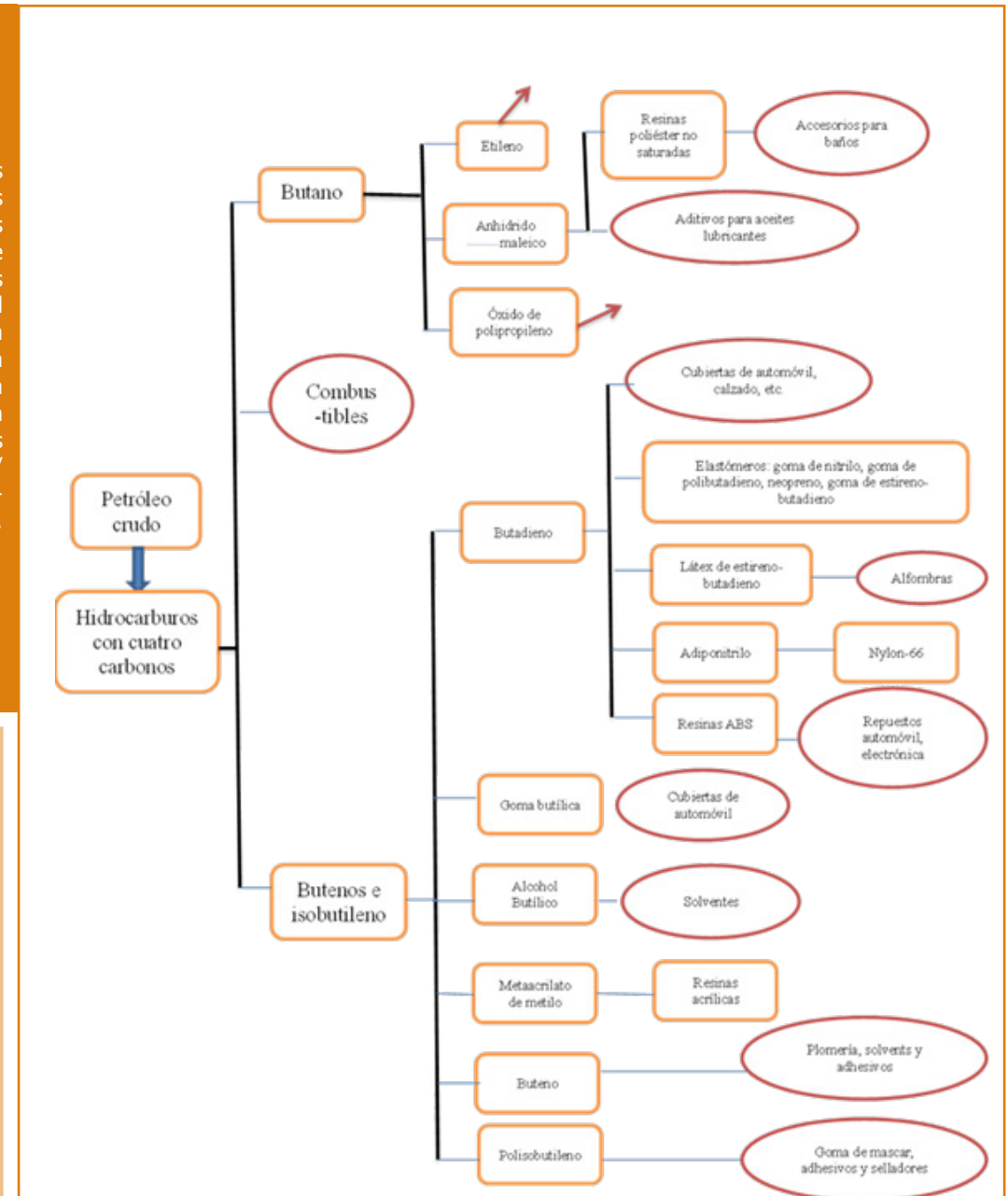
El origen del petróleo

El petróleo se originó a partir de organismos vivos, centralmente algas y zooplancton enterrados en los sedimentos, que después se transformaron en rocas sedimentarias (ver Capítulo 1). La acción de bacterias anaeróbicas transformó proteínas y azúcares en sustancias más sencillas, hasta que las bacterias murieron. A continuación los procesos abióticos de diagénesis generaron en primer lugar querógeno, una compleja mezcla de sustancias orgánicas, de composición muy variable, que van desde hidrocarburos predominantemente alifáticos (ver Cuadro 2-7) hasta aromáticos, con variables contenidos de azufre y otros elementos. El querógeno está alojado en los poros de la roca madre. Cuando esta se calienta hasta alrededor de 90°C, el querógeno comienza a generar petróleo (hidrocarburo líquido). Eventualmente, el petróleo acumulado es expulsado de los poros; el petróleo convencional queda alojado en trampas presentes en rocas reservorios, usualmente con una cubierta de gas natural, y con aguas salinas, de mayor densidad, en la parte inferior. Cuando la roca madre se calienta hasta alrededor de 130°C el querógeno produce hidrocarburo gaseoso, que al ser expulsado genera la cubierta de gas del petróleo convencional.

En cambio, el petróleo llamado no convencional no está alojado en bolsones como líquido libre. Hay una gran variedad de otras formas de presentación del petróleo, que dan cuenta del grueso del petróleo acumulado a lo largo de las eras

Figura 2-17.

Cadena química de los hidrocarburos de cuatro átomos de carbono. Las sustancias en cuadrados son insumos para procesos posteriores, las que figuran en óvalos son productos ofrecidos al consumidor. En el caso del etileno y del óxido de propileno se indica que los mismos tienen su propia cadena (etileno) o participan en otra cadena (la del propileno). Adaptado de American Chemistry Council (2018), Elements of Business Chemistry. Ver: <https://www.americanchemistry.com/2018-Elements-of-the-Business-of-Chemistry.pdf>.

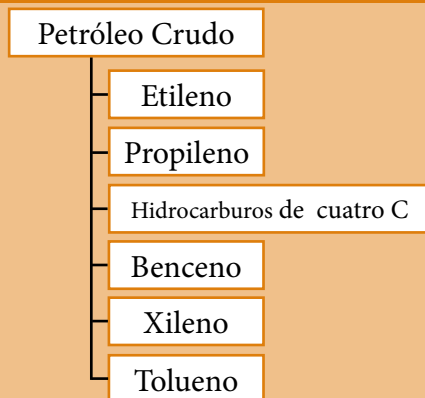


geológicas. Dentro de la categoría de yacimientos no convencionales son particularmente importantes los de *shale oil/shale gas* (en español petróleo o gas de lutitas). Las lutitas son rocas de grano fino que contienen los hidrocarburos en los poros. El proceso de *fracking* (estimulación hidráulica) fractura la roca inyectando mezclas presurizadas de agua, arena y aditivos, y de esa forma el hidrocarburo ocluido (gas o líquido) puede ser liberado y finalmente recogido en superficie.

Un informe de la Energy Information Agency de EE.UU. de 2011⁷ identificaba como recursos técnicamente recuperables de shale gas en Argentina en 772 trillones de pies cúbicos (TCF; hay que dividir este valor por 35,3 para obtener la cantidad en metros cúbicos). En la cuenca neuquina están las dos principales formaciones: Los Molles, a una profundidad entre 2900 y 3800 metros (160 TCF), y Vaca Muerta, situada alrededor de los 2500 m de profundidad (240 TCF).

Figura 2-15(a).

Principales productos inmediatos del petróleo crudo



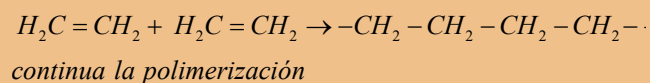
7. U.S. Energy Information Agency (2011). World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States. Ver: <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/archive/2011/pdf/full-report.pdf>.

Cuadro 2-16

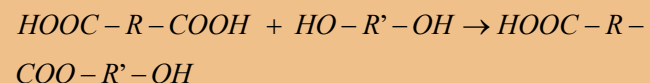
Los plásticos

La palabra plástico hace alusión a sus propiedades mecánicas: al ser comprimidos, se deforman sin romperse, por eso pueden formar láminas y también pueden moldearse.

Los plásticos son polímeros, obtenidos en general a partir del petróleo (ver Figuras 2-15, 2-16 y 2-17). Las reacciones químicas involucradas pueden implicar la agregación de monómeros, para ir formando cadenas largas, o la condensación de dos reactivos que al reaccionar van también generando cadenas largas. Un ejemplo del primer caso es la obtención de polietileno $(CH_2-CH_2)_n$ a partir de etileno $H_2C=CH_2$:



El poliéster, en cambio se genera al hacer reaccionar un alcohol con dos grupos funcionales $-OH$ con un ácido con dos grupos funcionales $\neg-COOH$:



La polimerización continúa por reacción del grupo $HOOC-$ con otro alcohol, y del grupo $-OH$ con otro ácido.

Los plásticos tienen dos tipos de comportamiento frente al calentamiento. Los termoplásticos, como el polietileno, se funden al calentarse, y a partir del líquido se puede volver a moldear a la forma que se elija. Los plásticos termoestables en cambio adoptan una forma definitiva cuando se fabrican, y no pueden volver a fundirse. En esta clase están por ejemplo las resinas epoxi y la melamina.

Los plásticos se usan para muchísimos fines; uno de los más extendidos es de envases de distintos tipos, pero también se usan plásticos en las industrias

electrónica, de la construcción y otras. Los materiales plásticos fabricados en mayor escala son:

- Polietileno de baja densidad (bolsas desechables)
- Polietileno de alta densidad (envases de agua, de detergentes, etc.)
- Polipropileno (para empaquetar alimentos y otros tipos de productos)
- Poliestireno (para envases de comidas, para envases diversos como poliestireno expandido - Telgopor®)
- Cloruro de polivinilo (PVC, usado entre otros fines para cañerías en su forma rígida y para cables en su forma flexible)
- Poliuretano (usado en su variedad termoestable como envases aislantes - las espumas, y en su variedad termoplástica en selladores, adhesivos, etc.)
- Tereftalato de polietileno (usado para los envases PET)
- Poliacrilatos (para fibras de muy diversas aplicaciones y para adhesivos - como "la gotita").

2.8. Impacto ambiental de las sustancias químicas fabricadas por el hombre

La actividad industrial genera sustancias químicas que son eventualmente liberadas al ambiente, ya sea en su forma original, o en la forma de sus productos de degradación. Los seres vivos, incluido el hombre pueden ser vulnerables a la acción de esas nuevas sustancias; el tema del impacto toxicológico de las sustancias fabricadas por el hombre se trata en el Capítulo 3. Y en el Capítulo 5 se discute la contaminación química en términos de los cuerpos receptores del contaminante (aire, agua, suelos). En esta sección describimos a la actividad fabril del hombre como origen de contaminantes químicos.

Todos los procesos de manufactura de nuevas sustancias químicas conducen no solo a la formación de sustancia

deseada, sino también a productos de desecho. Tomemos como ejemplo la fabricación de carbonato de sodio por el proceso Solvay. La misma implica una serie de reacciones químicas que no discutiremos, pero el balance final puede expresarse con la ecuación:



Por cada mol de carbonato de sodio (106 g) se genera también un mol de cloruro de calcio (111 g). La producción mundial de carbonato de sodio supera 40 millones de toneladas anuales, con lo que se genera también más de 40 millones de toneladas de cloruro de calcio. Si se le suman otros desechos, provenientes de las distintas etapas del proceso, se generan más de 60 millones de toneladas de desechos por año. En otras ocasiones, sin llegar a la magnitud (en masa) del proceso Solvay, se generan en cambio residuos peligrosos, que no pueden liberarse al ambiente. En el pasado, una estrategia usual fue la de almacenar los residuos peligrosos en barriles y enterrarlos. Ese fue, por ejemplo, el caso de Love Canal, descrito en el capítulo 5.

En otros casos el mayor problema de contaminación está asociado con sustancias que se generan en cantidades menores, pero que son peligrosas para el ambiente y/o para el hombre si no se controla su liberación al ambiente. Un ejemplo paradigmático es el de la enfermedad de Minamata, descrita en el Capítulo 5. Es también el caso de la preocupación por la posible liberación de dioxinas en el proceso kraft de obtención de pulpa de papel a partir de la celulosa de la madera (ver Cuadro 3.1).

Pero no solo los desechos del proceso de fabricación generan impacto ambiental. Las mismas sustancias químicas, después de ser usadas, pueden acumularse en el ambiente generando problemas importantes. Los dos ejemplos más inmediatos de esto son los agroquímicos no biodegradables (ver Capítulo 5), y los plásticos no biodegradables.

La contaminación por plásticos se manifiesta principalmente en ciudades y en los medios acuosos,

incluidos los océanos. El principal problema está vinculado con el carácter no biodegradable de los plásticos tradicionales. Una vez descargados al ambiente, se degradan lentamente, principalmente por acción de la luz solar.

Cuadro 2-17

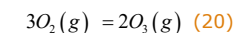
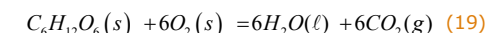
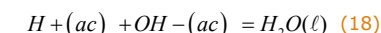
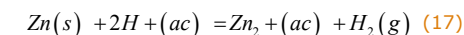
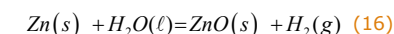
La isla de basura en el Océano Pacífico norte

Los plásticos que entran en el Océano Pacífico norte, tanto de las costas americanas como desde Asia y las diversas islas, va sufriendo diversos procesos de transformación. En primera instancia, los objetos macroscópicos van desintegrándose, y ello genera partículas pequeñas (lo que incluye micro y nanopartículas plásticas) que, por su densidad, se concentran en la región superficial de las aguas. Al mismo tiempo, las corrientes marinas van llevando el plástico mar adentro, hasta que eventualmente, en tiempos del orden de algunos años, el mismo queda atrapado en el llamado giro del Pacífico norte. Este giro está circunvalado por corrientes que dificultan la salida del material presente en su interior. La "isla de basura" no es una isla: es agua de mar con concentraciones importantes de partículas. Cuando se habla del tamaño de la isla, se está hablando de una porción de agua de mar superficial que contiene concentraciones de partículas por encima de un valor arbitrario. Por ese motivo, se dice a veces que su superficie es del orden de la de Venezuela, y otras veces se citan extensiones muy superiores a la superficie de Brasil.

La presencia del plástico tiene preocupantes consecuencias para la ecología marina, ya que por su tamaño las partículas pueden ser ingeridas por diversas especies y transferidas en la cadena trófica.

2.9. Tipos de reacciones químicas en el agua

De acuerdo con las ideas anteriores, en cualquier transformación química, se romperán algunas moléculas y se formarán otras, pero los átomos que constituyen las moléculas se mantendrán en número constante. Antes de discutir los tipos de reacciones más importantes que ocurren en el seno del agua, mostramos a continuación cómo se aclara en una ecuación química si las sustancias involucradas son sólidas (s), líquidas (l), gaseosas (g), o disueltas en solución acuosa (ac): En las ecuaciones 17 a 21 usamos el símbolo = en lugar de la flecha, para contemplar la posibilidad que la reacción tenga lugar de izquierda a derecha o de derecha a izquierda, según las condiciones en las que ocurre.



Las dos primeras describen de forma algo diferente el mismo fenómeno químico, el ataque de los ácidos y del agua sobre el cinc metálico, la corrosión acuosa de ese metal. La segunda introduce los iones en su formulación, para reflejar la existencia de estas especies en las soluciones acuosas. La ecuación (18) muestra que durante la corrosión un átomo de Zn pierde dos electrones y genera un ion Zn^{2+} . Los dos electrones perdidos son captados por los H^+ que forma el hidrógeno. Los iones H^+ fueron introducidos en la solución disolviendo un ácido, por ejemplo ácido clorhídrico, que se disoció en H^+ y Cl^- . Éstos últimos, que no aparecen en la ecuación (18), están implícitos tanto del lado izquierdo como del lado derecho de la flecha, y en igual cantidad de los dos lados de la ecuación (hay dos iones Cl^- de cada lado). La ecuación

(19) es idéntica a la (9), con la aclaración que los iones están disueltos en agua. La misma vinculación existe entre las ecuaciones (20) y (4). Finalmente, la ecuación (21) muestra la interconversión entre el oxígeno (O_2) y el ozono (O_3).

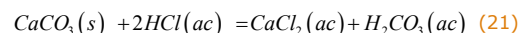
2.9.1. Reacciones ácido-base

Ya hemos mencionado que los ácidos son sustancias que pueden ceder protones y que las bases son sustancias capaces de aceptarlos. Las bases poseen a veces el ion hidróxido u hidroxilo. La Tabla 2.2 y Tabla 2.3 muestran ejemplos de ácidos y bases.

Tabla 2-2. Algunos ácidos comunes

Ácido Clorhídrico*	HCl
Ácido Sulfúrico	H_2SO_4
Ácido Nítrico	HNO_3
Ácido Acético	CH_3COOH
Ácido Oxálico	$(COOH)_2$
Ácidos Carboxílicos	R-COOH
Ácido Cianhídrico	HCN
Ácido Sulfhídrico*	SH_2
Ácido Carbónico*	H_2CO_3
Mercaptoácidos (tioles)	R-SH
Ácido Fosfórico	H_3PO_4
Ácido Sulfuroso	H_2SO_3
Ácido Nitroso	HNO_2
Ácido Bórico	BO_3H_3
Agua	H-OH

Puede notarse una clara relación entre los ácidos y las bases: las bases contienen las mismas especies que los ácidos, pero sin los protones. Por ejemplo, la reacción del carbonato de calcio con el ácido clorhídrico se escribe:



Como ya se discutió, los iones cloruro Cl^- que en realidad permanecen sin cambiar pueden eliminarse, y así escribir la ecuación (23):

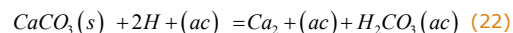
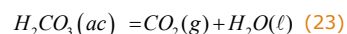
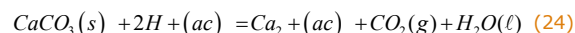


Tabla 2-3. Algunas bases comunes	
Hidróxido de sodio	NaOH
Óxido de calcio (cal viva)	CaO
Hidróxido de aluminio (alúmina)	$Al(OH)_3$
Hidróxido de magnesio	$Mg(OH)_2$
Carbonatos, como el de calcio	$CaCO_3$
Fosfatos, como el de calcio	$Ca_3(PO_4)_2$
Cianuros, como el de potasio	KCN
Amoniaco	NH_3
Sulfuros, como el sulfuro ferroso	FeS
Agua	H-OH

Además, el ácido carbónico se deshidrata:

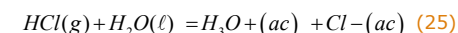


Las ecuaciones químicas pueden sumarse, eliminando las especies que se repiten en ambos lados de la flecha. Por eso, si sumamos las ecuaciones (23) y (24), nos queda:



Las reacciones de ácidos con bases se llaman reacciones de *neutralización*.

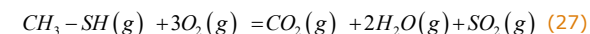
El agua es una sustancia muy especial, porque reacciona con los ácidos y con las bases:



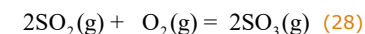
Ambientalmente, las reacciones ácido-base son de gran importancia. Ilustraremos el impacto ambiental de la generación antrópica de ácidos con algunos ejemplos importantes:

- Lluvia ácida

El quemado de derivados de petróleo genera esencialmente dióxido de carbono y agua, tal como se discute más abajo. Sin embargo, las naftas, y más aún el gasoil y fracciones más pesadas del petróleo contienen en mayor o menor cantidad sulfuros orgánicos, R-SH. Estos sulfuros, durante la combustión, se transforman en dióxido de azufre. Por ejemplo, tomando un compuesto orgánico muy sencillo:

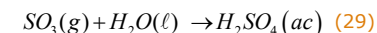


En el aire, el dióxido de azufre se oxida, dando trióxido de azufre:



Como ambos óxidos se pueden encontrar presentes, a veces se habla del contenido de SO_x del aire (x=2 o 3).

El trióxido de azufre es un óxido muy ácido, ya que en contacto con agua genera rápida e irreversiblemente ácido sulfúrico:

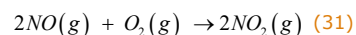
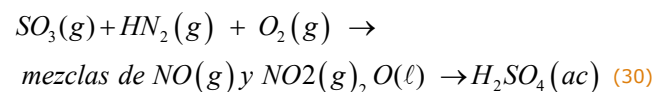


El agua que interviene en la ecuación (30) es el agua que está en la atmósfera, por ejemplo en forma de muy pequeñas gotitas en la niebla o en las nubes.

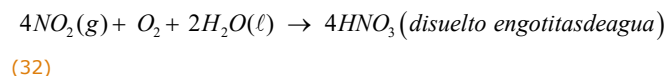
Cuando llueve, ese ácido sulfúrico llega al suelo y produce una serie de efectos deletéreos sobre sus propiedades físicas (estructura, textura, porosidad,

capacidad hidráulica, potencial de erosión, etc.) y químicas (capacidad de intercambio catiónico y aniónico, salinidad, pH, capacidad buffer, contenido de materia orgánica). Estos cambios afectan la fertilidad y potencial agronómico de los suelos; así como también su capacidad de soportar sistemas ecológicos. El ácido también es capaz de movilizar metales tóxicos que están insolubilizados, porque el ácido disuelve los óxidos metálicos (ver Capítulo 5).

Los óxidos de nitrógeno también contribuyen a la lluvia ácida. En este caso, el origen es la oxidación del nitrógeno atmosférico durante la combustión de los combustibles fósiles. Esa oxidación se vuelve importante a altas temperaturas, como las de los gases de escape de los automóviles:



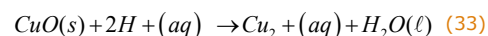
El dióxido de nitrógeno reacciona con el agua y el oxígeno generando ácido nítrico:



El ácido nítrico tiene el mismo efecto que el ácido sulfúrico.

- Lixiviado ácido de colas de minería

La disolución de óxidos, sulfuros y carbonatos metálicos por los ácidos es una reacción ácido-base. Por ejemplo, para el óxido de cobre:



Para el sulfuro de plomo:

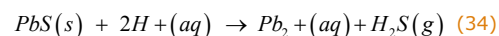
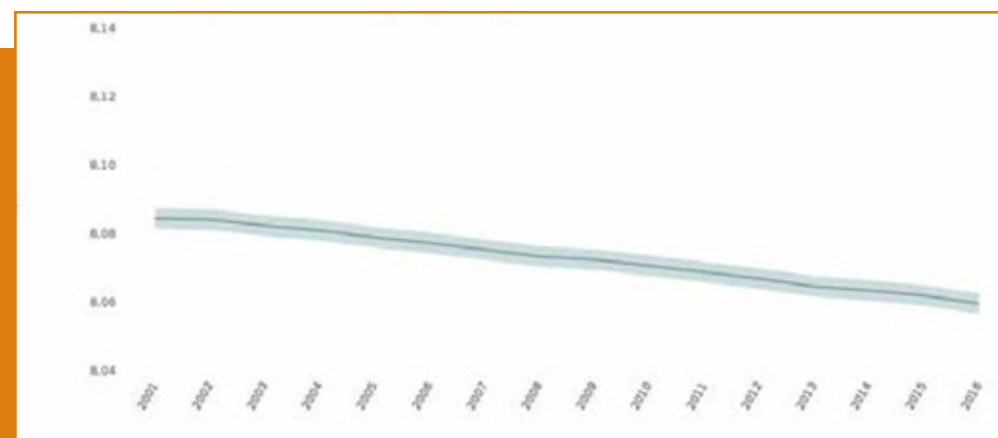
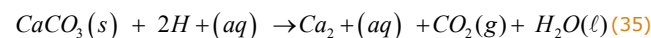


Figura 2-19.

Acidificación de los océanos. Disminución del pH del agua de mar superficial a escala global. Fuente: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/yearly-mean-surf-ce-sea-water#tab-chart_3

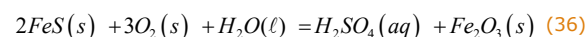


Para el carbonato de calcio:



Los iones metálicos disueltos son tóxicos; por ello su presencia en las aguas está regulada en función del uso que tendrá la misma (por ejemplo, para consumo humano, para consumo de ganado, para sustento de la vida acuática, para recreación, para riego, para uso industrial, para piscicultura, etc.).

En la extracción de minerales, los lixiviados de las colas son muchas veces volcadas directamente a cursos de agua. Estos lixiviados se generan por contacto del agua de lluvia o acuíferos con los sulfuros metálicos presentes en las colas de mineral. La oxidación de los sulfuros genera ácido sulfúrico:



El ácido sulfúrico así generado disuelve los óxidos y los sulfuros de metales tóxicos, y las aguas se contaminan fuertemente con estos metales.

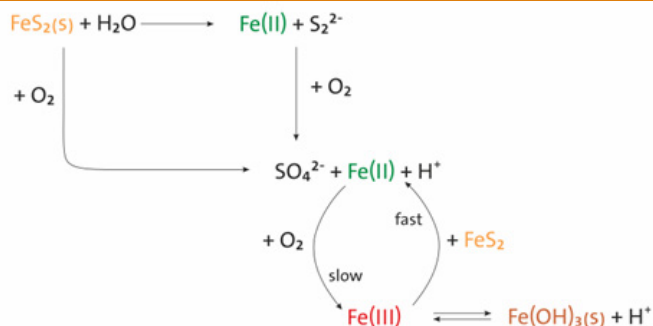
Drenaje ácido de minas

Se entiende por drenaje ácido de minas a la formación de aguas ácidas, ricas en sulfatos y metales producto de la lixiviación de sulfuros metálicos y pirita en colas de mineral de sitios mineros.

El proceso comienza con la meteorización abiótica del sulfuro; sigue con la incorporación de los metales a la solución, catalizada por microorganismos; continua con la neutralización de la misma; para, finalmente, precipitar en los ambientes mineros (Guidance for the Integrated Use of Hydrological, Geochemical, and Isotopic Tools in Mining Operations. (2020). Christian Wolkersdorfer, Darrell Kirk Nordstrom, Roger Daniel Beckie, Daniel S. Cicerone, Trevor Elliot, Mansour Edraki, Teresa Valente, Silvia Cristina Alves França, Pramod Kumar, Ricardo Andrés Oyarzún Lucero & Albert Soler i Gil. Mine Water Environ (2020). <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00666-x>). El impacto provocado por este proceso puede ser prevenido, mitigado o remediado (Chemosphere. 2019 Mar;219:588-606. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.053. Epub 2018 Nov 28. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling.

Figura 2-18.

Representación esquemática de los caminos de la oxidación abiótica de piritita/marcasite Basado en la información provista por (Kester et al. 1975; Singer and Stumm 1970; Stumm and Morgan 1996), siguiendo una idea de Banks (2004).



- Acidificación de los océanos

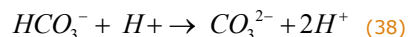
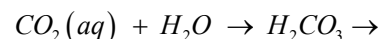
Los océanos tienen la capacidad de regular la concentración de H^+ . La forma usual de describir la concentración de H^+ en agua es una escala logarítmica (ver Capítulo 6 sobre logaritmos), llamada pH:

$$\text{pH} = -\log c_{\text{H}^+} \quad (37)$$

Históricamente, el pH del agua de mar ha sido 8,2, lo que equivale a decir que $c_{\text{H}^+} = 6,31 \times 10^{-9}$ mol/L. Este valor de concentración está aumentando, con lo que el pH está disminuyendo, para llegar a valores inferiores a 8,07 o $c_{\text{H}^+} = 8,51 \times 10^{-9}$ mol/L en 2016 tal como se presenta en la Figura 2-18.

En el Capítulo 4 volveremos sobre la acidificación de los océanos.

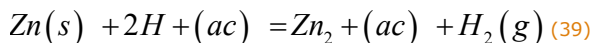
El origen del aumento de la acidez es la disolución de parte del exceso de CO_2 que está ingresando en la atmósfera:



Este aumento de acidez tiene importantes consecuencias ecológicas, en particular en los organismos que construyen exoesqueletos de CaCO_3 , ya que la solubilidad de este carbonato de calcio aumenta al aumentar la acidez.

2.9.2. Reacciones de óxido-reducción

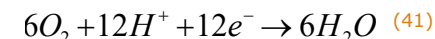
En una primera y muy grosera aproximación, son reacciones en las que interviene el oxígeno. En un contexto más general, son reacciones en las que una de las sustancias reaccionantes, el oxidante, le quita uno o más electrones al otro reactivo, el reductor. Un ejemplo es la reacción del cinc metálico con un ácido disuelto en agua, ecuación (17), que repetimos aquí:



El Zn es el reductor; cede sus electrones al H^+ , que genera hidrógeno gaseoso, y queda Zn_2^+ en la solución acuosa.

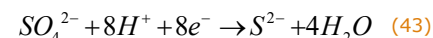
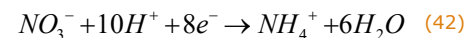
Tanto la respiración como la fotosíntesis son reacciones de óxido-reducción, o reacciones redox. El oxidante en la respiración es el O_2 , pero en medios anóxicos (sin oxígeno) puede ser reemplazado por otra especie química que sea aceptora de electrones. En aguas superficiales, predomina el oxígeno, pero en aguas más profundas, anóxicas, lo van reemplazando sucesivamente el nitrato, el sulfato, y sustancias orgánicas.

Dado que las reacciones redox implican intercambio de electrones, es común escribir la ecuación total como la suma de dos semi-ecuaciones: una de oxidación y una de reducción. Por ejemplo, la oxidación de la glucosa puede escribirse como la suma de las semi-ecuaciones (40) y (41). La primera representa la liberación de electrones por la sustancia que se oxida, y la segunda muestra la captación de esos mismos electrones por el oxidante. La separación en dos semi-ecuaciones es solo un procedimiento para facilitar la contabilidad de los electrones involucrados:



La suma de estas dos ecuaciones permite eliminar los electrones, y nos queda la ecuación completa de respiración.

Cuando no hay oxígeno, la segunda semi-ecuación cambia, y puede ser alguna de las siguientes, u otras equivalentes:



2.10. Soluciones, mezclas y concentraciones

Nuestro medio ambiente está formado por un gran reservorio gaseoso, la atmósfera, otro líquido, la hidrosfera, y uno sólido, la tierra y los sedimentos. Los gases y los líquidos son fluidos, lo que quiere decir que las moléculas contenidas en ellos se pueden mover y desplazar distancias grandes, a través de la difusión, la convección, y la circulación, mecanismos que no discutiremos. El transporte de las sustancias químicas en general y de los contaminantes en particular tiene lugar entonces esencialmente a través de la atmósfera y del agua. Las sustancias químicas de las rocas, el suelo y los sedimentos entran en estas cadenas transportadoras por meteorización física, química y biológica. Entre los procesos involucrados encontramos a la disolución de sedimentos y rocas en la interfaz con el agua; la vegetación, a través de las raíces, acidifica los suelos al tomar cationes metálicos y liberar protones a cambio. Por este mecanismo las raíces pueden fijar contaminantes que se bioacumulan y se incorporan a la cadena trófica.

Las moléculas individuales de sustancias extrañas que están presentes en un fluido están disueltas, formando una *solución* (disolución, en los libros españoles). Las soluciones tienen un *solvente* (el fluido mayoritario), y diversos *solutos*. La proporción en la que cada soluto se encuentra presentes en una solución está descrita por su concentración. Las normas y disposiciones

ambientales establecen límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes en agua o aire, y para expresar esas concentraciones pueden usarse diversas unidades de medida.

Las partículas de materia sólida presentes en un fluido y cuyo tamaño es típicamente del orden de un micrón no están disueltas, sino dispersas; las moléculas están disueltas y las partículas más grandes están dispersas. Si el tamaño y la densidad de las partículas son adecuadamente altos, las partículas tienden a separarse espontáneamente; por ejemplo, sedimentan en el fondo de una solución acuosa. Sin embargo, en condiciones adecuadas pueden permanecer tiempos largos en suspensión. Estos sistemas se llaman *mezclas*. La cantidad de partículas totales en aire y en agua también está sujeta a restricciones por las reglamentaciones ambientales. Su concentración también puede expresarse en diversas unidades de medida.

Una forma de indicar la concentración es indicar la cantidad de gramos existentes en 1 litro o en 1 kilo de solución o de mezcla. En el caso del agua, como la densidad es 1 kg/L, no hay diferencias importantes entre ambas elecciones para la cantidad de solución. Distinto sería el caso de soluciones concentradas, pero las mismas son importantes sólo en el caso de efluentes industriales. La Tabla 2.4 muestra cuáles son las relaciones que vinculan a las distintas formas de expresar la concentración en gramos por litro. Cada fila indica cuántas veces más grande o más chica es la unidad de la primera columna que la de las demás columnas. Debe notarse que 1 mg/L es idéntico a 1 ppm (partes por millón). 1 ppb es 1 parte por billón americano, que es nuestro millardo, 1 ppt es 1 parte por trillón americano, nuestro billón o millón de millones.

En Química, debido al papel preponderante que juegan las moléculas, es común expresar la cantidad de sustancia no como el número de gramos, sino como el número de moles. Si dos soluciones contienen, la primera 0,001 mol de NaCl por litro, y la segunda 0,001 mol de KNO₃ por litro, ambas soluciones contienen el mismo número de moléculas por litro, pero no el mismo número de gramos. Una solución que contiene 1

mol por litro de solución es una solución **1 molar** (1 M, 1 mol/L ó 1 mol/ dm⁻³). Una solución 1.000 veces más diluida es una solución 1 milimolar (1 mM), y una un millón de veces más diluida es 1 micromolar (1 μ M).

Tabla 2-4. Unidades de concentración cuando la cantidad del soluto está dada en algún múltiplo de gramos.

	g%	g/L	mg/L	ppm	μ g/L	ppb	ppt
g%	1	10	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁷	10 ⁷	10 ¹⁰
g/L	0,1	1	10 ³	10 ³	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁹
mg/L	10 ⁻⁴	10 ⁻³	1	1	10 ³	10 ³	10 ⁶
ppm	10 ⁻⁴	10 ⁻³	1	1	10 ³	10 ³	10 ⁶
μ g/L	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁻³	1	1	10 ³
ppb	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁻³	1	1	10 ³
ppt	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁻³	1

Según de qué sustancia disuelta estemos hablando, 1 mol corresponderá a cantidades distintas de gramos. El número de moles **n** y la masa **w** (en g) están vinculados por la siguiente ecuación, donde M es la masa molar, que ya discutimos antes:

$$n = w / M \quad (44)$$

Las concentraciones entonces están vinculadas por la relación muy simple:

$$\text{Concentración molar} = (\text{concentración en g/L}) / M \quad (45)$$

Por ejemplo, el agua de mar contiene cloruro de sodio en una concentración de alrededor de 3 g%. La masa molar M del cloruro de sodio (NaCl) es (23 + 35,5) = 58,5 g/mol. Por lo tanto, la molaridad del NaCl en el agua de mar es (30 g/L) / 58,5 (g/mol) = 0,5 molar. Por una coincidencia desafortunada, se usa la letra M tanto para representar la molaridad (número de moles por litro de solución) como la masa molar (en gramos por mol). Es por eso que la molaridad es 0,5 M, expresión en la que no debe confundirse la M de molaridad con la M de masa molar.

En el caso de los contaminantes atmosféricos, la concentración puede expresarse también como una fracción de volumen. Por ejemplo, 5 ppmv, significa que, del volumen total de aire, 5 partes por millón corresponden al contaminante. En los gases, el volumen que ocupa cada sustancia de la mezcla es proporcional al número de moles, porque un mol de cualquier gas ocupa el mismo volumen, siempre y cuando se mantengan constantes la temperatura y la presión. Cinco partes por millón en volumen significa entonces que de cada millón de moléculas de todo tipo (N₂, O₂, H₂O, CO₂, Ar), cinco son del contaminante.

También puede indicarse la cantidad (concentración) de contaminante indicando su presión parcial. La presión atmosférica normal es 1 atmósfera, ó 0,1 MPa. La contribución del contaminante anterior a esa presión total será de 0,000 005 atm, ó 0,000 000 5 MPa: <https://mars.jpl.nasa.gov/msp98/news/mco991110.html>.

2.11. Química atmosférica

Después de describir la química del agua y de sus especies disueltas, veamos la química de la atmósfera.

Ya se mencionó en el Capítulo 1 que la atmósfera está compuesta por nitrógeno, oxígeno, argón, agua y otras sustancias. La Tabla 2-5 muestra la composición química del aire seco

A los componentes listados en la Tabla 2-5 se deben agregar diversos contaminantes y componentes naturales que juegan un papel relevante en la contaminación atmosférica. También se debe agregar el agua, presente en cantidades muy variables, tanto como vapor (moléculas individuales en la masa gaseosa) y como gotitas de agua líquida y de hielo, en nubes y en la niebla; típicamente se indica su concentración como de alrededor del 1% como vapor, aunque lógicamente depende de la humedad relativamente ambiente del momento.

Tabla 2-5. Composición del aire seco.

Componente		Contenido
Mayoritarios (en %)	Nitrógeno (N ₂)	78,08
	Oxígeno (O ₂)	20,95
Minoritarios (en ppmv)	Argón (Ar)	9340
	Dióxido de carbono (CO ₂)	400
	Neón (Ne)	18,18
	Helio (He)	5,24
	Metano (CH ₄)	1,7
	Kriptón (Kr)	1,14
	Hidrógeno	0,55

La troposfera es la que soporta las reacciones redox que tienen lugar en aguas superficiales, ya que aporta el oxígeno necesario para la respiración y para la oxidación de materia orgánica; también recibe oxígeno de la fotosíntesis en las aguas superficiales. Es también el lugar donde se acumulan los contaminantes gaseosos que genera la actividad antrópica. Veamos algunos de esos contaminantes:

Ozono. El ozono es una sustancia cuya molécula está formada por tres átomos de oxígeno unidos entre sí, tal como se ve en la Figura 2-19. Allí se puede ver la diferencia con el oxígeno.

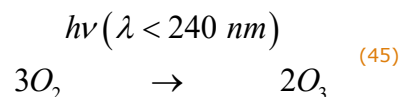
Figura 2-19.

Las moléculas de ozono (O₃, a la izquierda) y oxígeno (O₂, a la derecha)



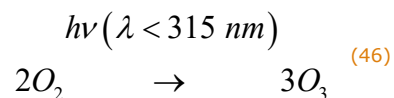
El ozono es un oxidante más energético que el oxígeno, y su presencia en la troposfera es nociva para los cultivos; además, es un importante gas de efecto invernadero (ver más adelante), por lo que su formación en la troposfera contribuye al calentamiento global. El ozono se origina durante la combustión incompleta de diésel (gasóleo o gasoil) y otros combustibles, y también durante la operación de fotocopiadoras (es el responsable del olor típico de los ambientes con estas máquinas, cuando la concentración es del orden de 10 µg/L).

El ozono, contaminante de la troposfera, es en cambio una sustancia fundamental para la vida en la estratosfera. Allí se forma por una reacción fotoquímica, la reacción descrita por la ecuación (20), que sólo puede tener lugar cuando hay una fuente de energía adecuada. La energía necesaria es provista por fotones ultravioleta de longitud de onda menor que 240 nm, de la radiación solar, como se muestra en la ecuación (45):



Esta reacción fotoquímica absorbe y por lo tanto contribuye a atenuar la radiación de esas longitudes de onda, impidiendo que llegue a la superficie terrestre, donde tendría efectos muy deletéreos sobre la vida.

Es más, el ozono así formado absorbe radiación ultravioleta de longitudes de onda mayores, contribuyendo a filtrar efectivamente la radiación UVC (200-280 nm) y siendo el responsable de filtrar la radiación UVB (280-315 nm). Al absorber esta radiación, se produce el proceso inverso al (45):



El efecto de filtro de la radiación UV ya se mostró en la Figura 1-26.

Se establece un balance entre los procesos (45) y (46), por lo que se alcanza un estado estacionario en el que la concentración de ozono permanece constante. Si por cualquier motivo se acelera la reacción (46) esa concentración disminuye, y el efecto de filtrado se ve afectado. Los gases conocidos como clorofluorocarbonos, que son hidrocarburos en los cuales los átomos de hidrógeno se han remplazado por átomos de cloro y/o flúor, pueden llegar a la estratosfera y acelerar notablemente la reacción (46), y por eso se dice que "destruyen la capa de ozono", o generan el "agujero de ozono". Esos gases se usaron en la industria de la refrigeración, y han sido remplazados por otros que son destruidos en la troposfera, y no llegan a la estratosfera. Este tema se describe en más detalle en el Capítulo 5.

Óxidos de azufre. Son los responsables principales de la lluvia ácida. Este tema ya se discutió (Sección 2.9.1). **Óxidos de nitrógeno.** El nitrógeno se combina con el oxígeno para formar varios óxidos. Los más importantes son el óxido nitroso (óxido de dinitrógeno, N₂O), el monóxido, NO y el dióxido, NO₂. Estos dos últimos en la atmósfera suelen interconvertirse, y por eso suele agrupárselos como NO_x. El primero no es tóxico en sí mismo, pero contribuye al efecto invernadero, y regula la concentración de ozono en la estratosfera. Además, puede oxidarse por el oxígeno atmosférico y formar el dióxido. Se origina naturalmente, en el metabolismo bacteriano, pero hay muy importantes contribuciones de la agricultura y, en menor medida de la industria. Los óxidos NO_x por su parte se originan especialmente durante la combustión de combustibles fósiles y son contaminantes troposféricos, que contribuyen a la lluvia ácida, como ya se discutió. También juegan un papel muy importante en la generación del smog fotoquímico: reaccionan con los compuestos orgánicos volátiles (COPs, ver más abajo), formando sustancias nocivas para la salud, como el nitrato de peroxiacetilo (H₃CC(O)(O₂)NO₂, o PAN, por su nombre en inglés), que se muestra en la Figura 2-20.

Compuestos orgánicos volátiles. Son sustancias orgánicas de bajo punto de ebullición, que al volatilizarse se incorporan a la troposfera y generan diversos problemas. Incluyen al metano, a los ya mencionados

clorofluorocarbonos, al formaldehído, al benceno, el tolueno y el xileno (llamados BTX), el cloruro de metilo y muchos otros. La Figura 2-21 muestra las moléculas de algunos de estos compuestos.

Figura 2-20.

Molécula de nitrato de peroxiacetilo.



Figura 2-21.

Modelos de las moléculas de metano (CH_4), formaldehído (CH_2O) y tolueno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) (arriba, de izquierda a derecha), y de xileno ($\text{H}_3\text{CC}_6\text{H}_4\text{CH}_3$) y cloruro de metileno (CH_2Cl_2) (abajo, de izquierda a derecha). La molécula de benceno se mostró en la figura 2-5.

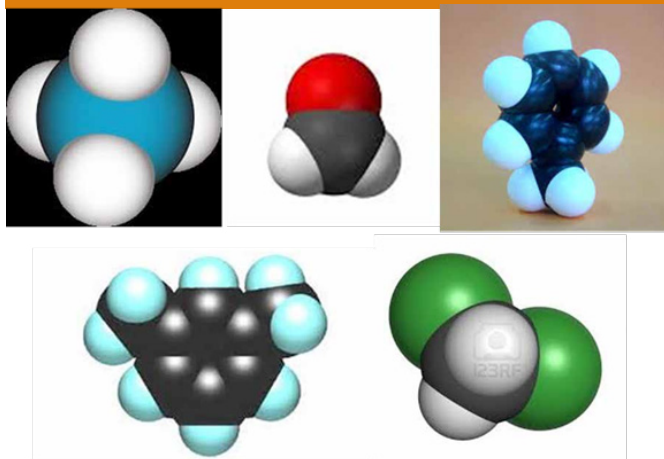
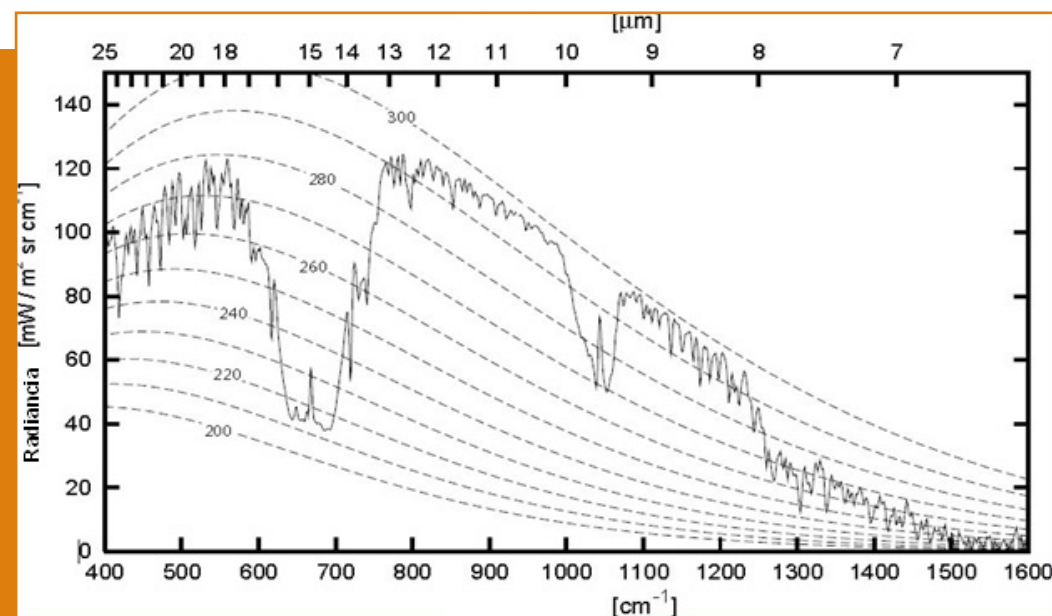


Figura 2-22.

En línea continua, espectro de la radiación infrarroja emitida al espacio. En líneas de puntos, los espectros calculados teóricamente para la emisión de cuerpos a las temperaturas indicadas (en kelvins). Se indica cuáles son las sustancias responsables de la disminución en la emisión.



Material particulado. Esta material está compuesto por partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire. Su composición puede ser muy variable, y en gran medida es de origen natural. Por su composición química y su tamaño, el material particulado más pequeño, de diámetro menor que 2,5 μm es el más nocivo para la salud. El material particulado también tiene un efecto importante sobre el balance energético atmosférico (ver Capítulo 5). Es mucho más difícil estimar esta contribución que la de los gases de efecto invernadero. Un caso extremo, apocalíptico, fue el asociado con el impacto de un meteorito de gran tamaño en la península de Yucatán, en México, hace unos 65.000.000 años (ver Cuadro 4-3). El efecto de largo plazo fue una larga noche producida porque las partículas no dejaban pasar la luz del sol. Este episodio se asocia con una de las extinciones masivas que registra la historia de nuestro planeta. Sin llegar a esos extremos, en los últimos años nos hemos familiarizado con los efectos sobre la salud y la aeronavegación de las plumas de vidrios volcánicos provenientes de la región limítrofe con Chile, en su parte austral (erupción de los volcanes Hudson y Peteroa).

Otros contaminantes. La variedad de sustancias que pueden ingresar a la atmósfera es muy grande, provenientes tanto de fenómenos naturales como de la acción antrópica: algunos metales, como mercurio y plomo; gas radón (radiactivo); amoníaco; monóxido de carbono, dióxido de azufre; dióxido de nitrógeno; entre otros (ver Decreto 1074/18 reglamentario de la Ley 5965 de la Provincia de Buenos Aires).

Los componentes minoritarios de la Tabla 2.5 y el agua atmosférica juegan un papel muy importante en el balance energético de la atmósfera discutido en Capítulo 1 (ver Figura 1-26 y Figura 1-27). La Figura 1-26 muestra que el agua filtra varias regiones del espectro de la radiación solar que ingresa a la atmósfera; en particular, el agua y el dióxido de carbono (en menor medida) filtran radiación infrarroja. La energía así absorbida es después reemitida y llega parcialmente a la superficie terrestre y en parte es reemitida al espacio exterior. Ahora nos interesa el fenómeno inverso: esos gases también son capaces de absorber la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra (ver Figura 1-27). La superficie terrestre emite 390 vatios

por metro cuadrado en forma de radiación infrarroja. Sin embargo no toda esa energía es liberada al espacio exterior: desde el tope de la atmósfera se emiten sólo 240 vatios por metro cuadrado. La diferencia es la energía absorbida por los gases efecto invernadero, que actúan como una "frazada" que mantiene parte del calor terrestre.

La emisión de radiación electromagnética por un cuerpo depende de la temperatura. Max Planck propuso la fórmula que vincula la distribución en longitudes de onda de la radiación emitida con la temperatura del cuerpo emisor. A mayor temperatura, menor la longitud de onda del máximo de la curva de distribución de la radiación emitida. Por eso nuestros cuerpos emiten radiación infrarroja, mientras que, por ejemplo el Sol emite radiación visible y ultravioleta. La curva de distribución de las frecuencias emitidas por la superficie terrestre corresponde a un cuerpo cuya temperatura promedio es de 288 K (16°C); en cambio, la radiación emitida al espacio exterior desde la atmósfera corresponde a una temperatura de 255 K (-17°C). La Figura 2-22 muestra, en líneas punteadas, los espectros de emisión de radiación de cuerpos que se encuentran a temperaturas comprendidas entre los 200 y los 300 K. Puede comprobarse que al aumentar la temperatura el máximo se desplaza hacia longitudes de onda menores (frecuencias mayores). La curva llena corresponde a la región infrarroja de la Figura 1-25.

Superpuesta, y en línea llena, se muestra la curva correspondiente a la emisión medida de radiación desde la superficie. Puede apreciarse que el máximo está efectivamente en el valor esperado para una temperatura de alrededor de 288 K. Sin embargo, puede apreciarse también la gran disminución en la emisión en las regiones en las que el dióxido de carbono, el ozono, el metano y el agua absorben radiación.

La Figura 2-22 muestra la radiación infrarroja emitida al espacio exterior; allí se ve la capacidad del agua, del dióxido de carbono y del metano para absorber ciertas longitudes de onda. También contribuyen a absorber energía los clorofluorocarbonos y el óxido nitroso (N₂O).

Hay varios factores que pueden alterar el balance energético de la atmósfera: cambios en la irradiancia solar, cambios en el albedo (causados por nubes, por cambios en la cobertura vegetal de la superficie terrestre, etc.), cambios en la concentración de material particulado y aerosoles en la atmósfera, y cambios en la concentración de los gases efecto invernadero en la atmósfera. Estos factores generan lo que se conoce como forzante radiativo: se produce un desbalance entre la energía que ingresa a la atmósfera y la que se emite. Ese desbalance termina manifestándose como un cambio de la temperatura de la superficie terrestre, y existe una relación lineal entre las variaciones en el forzante radiativo ΔFR y el cambio de temperatura cerca de la superficie ΔT :

$$\Delta FR = \lambda \Delta T \quad (47)$$

La constante λ se conoce como parámetro de sensibilidad climática.

Los forzantes radiativos positivos conducen a un aumento de la temperatura, pero por ejemplo una disminución de la actividad solar produce un forzante radiativo negativo, con eventual disminución de la temperatura superficial. El efecto de aerosoles y nubes es el más complejo y difícil de analizar y se acepta que en general conduce a valores negativos de FR.

Cada sustancia altera el balance energético de forma distinta, dependiendo de su capacidad de absorción de energía de radiación infrarroja y de su persistencia en la atmósfera. Se suele indicar para cada sustancia un índice conocido como GWP (*Global Warming Potential*). La Tabla 2.6 muestra los valores de los GWP de los gases efecto invernadero más importantes, tomando como punto de referencia al dióxido de carbono (GWP(CO₂) = 1). Para una discusión completa, ver Forster y col. 2007.

Tabla 2-6. Valores de Global Warming Potential (GWP) referidos al dióxido de carbono

Sustancia	GWP
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310
CCl ₃ F	3800
CCl ₄	1400

Es así que 1 kg de metano puesto en la atmósfera provoca un forzante radiativo 21 veces mayor que 1 kg de dióxido de carbono, y que pequeñas cantidades de gases fluoroclorocarbonados pueden producir efectos muy importantes.

El impacto del efecto invernadero sobre el cambio climático se discute en el Capítulo 4.

2.12. Índices de Calidad

La Real Academia Española define calidad como el conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor (Diccionario de la lengua española, RAE Vigésimotercera Edición, <http://dle.rae.es/?id=6nVpk8P|6nXVL1Z>). La calidad o aptitud de uso de un cuerpo de agua, de la atmósfera, o de un suelo depende de una gran cantidad de factores. Dentro de ellos, se destaca la gran variedad de sustancias químicas que pueden estar presentes en los factores ambientales (como el agua, el aire y el suelo). Esta variedad hace compleja la tarea de "clasificar" su calidad o aptitud de uso. Los gestores ambientales recurren entonces a construir índices de calidad que facilitan la toma de decisión para el desarrollo (o no) de acciones de intervención antrópica.

Los índices en general se presentan en forma de un número o clasificación descriptiva que resume y comprime una gran cantidad de datos o información proveniente de variables ambientales medibles. El propósito principal de los índices de calidad es simplificar el análisis de dicha información para que pueda ser útil para la toma de decisión; tanto para los responsables

de gestión ambiental como para el público en general. En definitiva, los índices tienen por finalidad:

- Resumir los datos existentes provenientes de la medición de variables ambientales medibles;
- Comunicar la calidad o aptitud de uso de un factor ambiental dado;
- Evaluar la vulnerabilidad o susceptibilidad a la contaminación de un determinado factor ambiental;
- Priorizar acciones a desarrollarse en factores ambientales;
- Cuantificar el impacto de proyectos o establecimientos en determinados emplazamientos.

El cálculo de los índices de calidad se lleva a cabo a partir de mediciones de variables (indicadores) físicas, químicas, biológicas, geológicas, hidrológicas, bióticas, socioeconómicas y culturales.

Entre las variables típicas (indicadores) relevadas en agua, aire y suelo podemos mencionar:

- *Para agua:* temperatura, penetración de la luz, oxígeno disuelto, turbidez, sólidos suspendidos totales, salinidad, sólidos disueltos totales, dureza, alcalinidad, nitrato, nitrito y amonio, nitrógeno total orgánico, fósforo, metales, compuestos orgánicos volátiles como benceno, tolueno y xileno (BTX), y no volátiles como policlorobifenilos (PCBs), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), etc.
- *Para aire:* óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado en suspensión (MPS), CO, CO₂, CH₄, metales en MPS, benceno, xileno y tolueno (BTX).
- *Para suelo:* temperatura, humedad, color, textura, estructura, contenido de materia orgánica, nitratos, fósforo, amonio, capacidad de intercambio iónico (CIC), salinidad, metales, compuestos orgánicos volátiles, etc.

En todos los casos es muy importante aclarar en qué unidades están expresados los valores medidos de cada indicador, y conocer también la incerteza de los valores usados para el cálculo del índice.

Los índices ambientales emplean algunos de los indicadores antes mencionados para clasificar los factores ambientales agua, aire y suelo, por ejemplo según su aptitud de uso. Su construcción matemática puede ser más o menos compleja; más o menos objetiva. A continuación se presentan alguno de ellos.

2.12.1. Índices de calidad del Aire

La calidad del aire (también llamada nivel de inmisión) resulta en cada momento y en cada lugar del balance entre el ingreso de contaminantes al lugar de medición (por generación o por transporte desde otras regiones) y su desaparición (por destrucción o por migración a otros lugares). La calidad entonces varía con el lugar y con el tiempo. La emisión de contaminantes a la atmósfera es por lo tanto un factor importante pero no el único que define la calidad. Describiremos brevemente el Pollution Standard Index y el Air Quality Index.

Pollution Standard Index (PSI) – EEUU (Ott, 1978).

Para su construcción se tuvo en cuenta que el índice debe cumplir con los siguientes criterios:

- Ser entendido por el público con facilidad.
- Incluir los principales contaminantes presentes en aire y tener capacidad de incluir a nuevos.
- Estar relacionado con estándares de calidad del ambiente atmosférico.
- Estar basado en hipótesis científicas razonables.
- Ser consistente con los niveles perceptibles de contaminación del aire.
- Representar variaciones espaciales de la calidad del aire.
- Mostrar variaciones diarias de la calidad del aire.
- Permitir la predicción, con anticipación de 1 día,

de situaciones que requieran llevar a cabo toma de decisión para la protección de la salud de las personas.

Los contaminantes considerados en el PSI son: sólidos en suspensión (MPS), dióxido de azufre, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno. El valor 100 del índice representa calidad óptima y se obtiene comparando la calidad del aire de corto plazo con los estándares que miden la máxima concentración a la que no se han observado efectos sobre la salud. Por ejemplo, si para un determinado contaminante se ha establecido que 10 µg/L es un valor seguro, para cada valor medido V µg/L ($V > 10$), se calcula el índice como $Q = (10/V) \times 100$. Puede advertirse que este valor resulta ser 100 cuando el nivel del contaminante es 10 µg/L, y disminuye a medida que V aumenta. Si en este ejemplo $V < 10$, se acepta que el índice sigue siendo 100 (nivel óptimo de calidad). Como valor seguro se puede tomar, por ejemplo el llamado NOAEL (ver Sección 3.4). El procedimiento se repite para cada uno de los contaminantes y se escoge para informar como PSI el índice del peor, el que refleja un mayor exceso de contaminante con respecto al valor considerado adecuado para la salud. Se puede advertir que el PSI se basa en los efectos sobre la salud.

Este índice fue reemplazado en 1999 por el Air Quality Index (USEPA) para permitir la incorporación de ozono a nivel del suelo.

Air Quality Index (AQI - EE.UU. United States Environmental Protection Agency, USEPA)

Es un índice para la presentación de informes diarios de calidad del aire. Permite comunicar cuán limpio o contaminado está el aire y los efectos en la salud asociados a lo que podría ser un problema para la población. El AQI se centra en efectos sobre la salud que pueden surgir dentro de unas pocas horas o días después de respirar aire contaminado. La USEPA calcula el AQI para los cinco principales contaminantes regulados por la Ley de Aire Limpio: ozono a nivel del suelo, la contaminación por partículas (material particulado), monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Para cada uno de estos contaminantes, la USEPA estableció estándares nacionales de calidad del

aire para proteger la salud pública. El ozono troposférico y las partículas suspendidas en el aire son los dos contaminantes que suponen la mayor amenaza para la salud humana en ese país. La comunicación pública se hace informando el AQI y también con un código de colores como se indica en la Tabla 2.7.

Tabla 2-7. Interpretación de los valores de AQI (Aire Quality Index) en función de su impacto en la salud

Air Quality Index (AQI Valores)	Niveles de preocupación para la salud	Colores
Cuando el AQI se encuentra en este intervalo:	...las condiciones del aire son:	...simbolizado por el color
0-50	Bueno	Verde
51-100	Moderado	Amarillo
101-150	Insalubres para grupos sensibles	Naranja
151-200	Insalubre	Rojo
201-300	Muy insalubre	Púrpura
301-500	Peligroso	Marrón

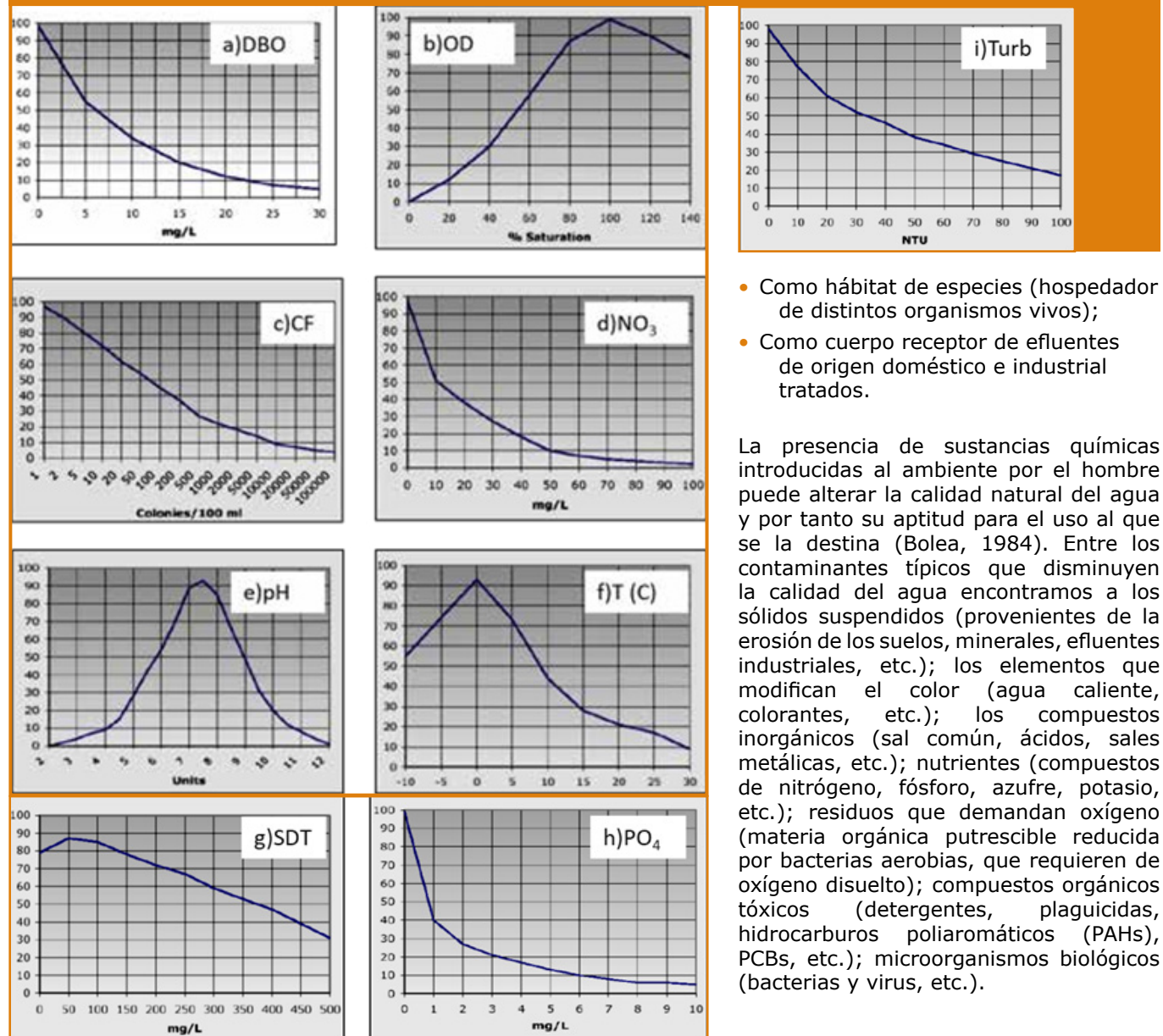
2.12.2. Índices de Calidad de Agua

Los índices de calidad de agua definen la aptitud de uso de los cuerpos de agua. Interesa conocer su calidad para los diversos usos del agua que se indican a continuación:

- Su utilización fuera del lugar donde se encuentra (fuente de agua para consumo humano –incluye diversos usos domésticos, industriales –incluyendo refrigeración y como materia prima de distintos procesos, para riego y fuente de agua para bebida de ganado);
- Su utilización en un curso o masa de agua (recreación con contacto directo y sin contacto directo (incluye pesca, navegación deportiva etc.);

Figura 2-22.

Curvas de las funciones I_i para los parámetros de la Tabla 2-8.



- Como hábitat de especies (hospedador de distintos organismos vivos);
- Como cuerpo receptor de efluentes de origen doméstico e industrial tratados.

La presencia de sustancias químicas introducidas al ambiente por el hombre puede alterar la calidad natural del agua y por tanto su aptitud para el uso al que se la destina (Bolea, 1984). Entre los contaminantes típicos que disminuyen la calidad del agua encontramos a los sólidos suspendidos (provenientes de la erosión de los suelos, minerales, efluentes industriales, etc.); los elementos que modifican el color (agua caliente, colorantes, etc.); los compuestos inorgánicos (sal común, ácidos, sales metálicas, etc.); nutrientes (compuestos de nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, etc.); residuos que demandan oxígeno (materia orgánica putrescible reducida por bacterias aerobias, que requieren de oxígeno disuelto); compuestos orgánicos tóxicos (detergentes, plaguicidas, hidrocarburos poliaromáticos (PAHs), PCBs, etc.); microorganismos biológicos (bacterias y virus, etc.).

Water Quality Index (WQI) - EE.UU. NSF (Brown y col. 1970)

Fue desarrollado en EE.UU. por la *National Sanitation Foundation* (NSF) en 1970. Se desarrolló a partir de un Delphi⁸, utilizando un panel de 142 personas de EE.UU. con experiencia en diversos aspectos de la gestión de la calidad del agua. Se enviaron tres cuestionarios. En el primero, se les pedía que consideraran 35 posibles variables para su inclusión en un índice de calidad de agua. En el cuestionario número 2 se revisaron los resultados del 1 y se obtuvieron como variables más importantes las siguientes nueve: oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, demanda biológica de oxígeno a los cinco días, nitratos, fosfatos, variación térmica, turbidez y sólidos totales. A cada una de las variables se le asignó un factor de peso relativo w_i , en función de su importancia. La importancia fue determinada teniendo en cuenta como eje central a la salud pública, basados en el uso del agua como fuente para consumo humano, y poniendo el énfasis en los indicadores de contaminación convencionales, no en los tóxicos.

La Tabla 2.8 muestra los nueve parámetros evaluados, las unidades de medida usadas en el laboratorio para expresar el resultado del análisis, y los factores de peso w_i asignados a cada parámetro. Nótese que la suma de todos los factores de peso es la unidad.

Tabla 2-8. Parámetros, unidades de medida y factores de peso en el WQI		
Parámetro	Unidad	w_i (factor de peso)
DBO	mg/L	0,11
Oxígeno disuelto	% de saturación	0,17

8. El Delphi es un método cuyo objetivo es la exploración de ideas creativas y confiables para la producción de información adecuada para la toma de decisión. Está basado en un proceso estructurado para recolectar y filtrar conocimiento de un grupo de expertos por medio de una serie de cuestionarios intercalados con opiniones recibidas como devolución del mismo. Mayor información puede encontrarse en <http://www.iit.edu/~it/delphi.html>

Coliformes fecales	Unidades formadoras de colonia/100 mL	0,16
Nitratos	mg/L	0,10
pH	Unidades de pH	0,11
Temperatura	°C	0,10
Sólidos disueltos totales	mg/L	0,07
Fósforo total	mg/L	0,10
Turbidez	NTU (unidades nefelométricas de turbidez)	0,08

El cuestionario número 3 permitió generar las funciones de subíndice I_i para cada una de las variables seleccionadas en 2. Estas funciones describen cómo varía la calidad del agua en función de la concentración de cada contaminante (o variable seleccionada). Se construyeron de forma tal que permitieran tener en cuenta al 80 % de las curvas generadas por los 142 panelistas.

La Figura 2-23 a-i presenta algunos ejemplos de conversión de las variables de la Tabla 2.8 (columna central) en las funciones de subíndice I_i en calidad de agua. En todos los casos la función de subíndice adopta el valor 100 cuando la calidad es óptima, y cuanto más bajo es su valor peor es la calidad.

El índice de calidad es entonces simplemente la suma ponderada de las funciones subíndice:

$$NSF\ WQI = \sum w_i I_i \quad (48)$$

En esta ecuación se realiza la suma de los 9 términos, desde $i=1$ hasta $i=9$, correspondientes a las 9 funciones subíndice escogidas; w_i es el peso (importancia) asignado a cada variable, e I_i es el valor de cada función subíndice, obtenido de las curvas de la Figura 2-23 a partir de la medición de cada parámetro.

La Tabla 2-9 presenta un ejemplo de la evaluación de la calidad de un agua típica.

Tabla 2-9. Cálculo de las funciones subíndice a partir de los valores medidos, y valor final del WQI			
Parámetro	Valor medido	w_i	I_i
DBO (mg O ₂ /L)	15	0,11	20
OD (% saturación)	70	0,17	75
Coliformes Fecales (colonias/100 mL)	10000	0,16	10
Nitrato (mg/L)	50	0,10	10
pH (UpH)	7	0,11	88
Temperatura (°C)	+5	0,10	72
SDT (mg/L)	50	0,07	87
PO4 ³⁻ (mg/L)	5	0,10	3
Turbidez (NTU)	50	0,08	39
WQI resultante	44		

Alternativamente, el cálculo puede hacerse no como una suma, sino como resultado de multiplicar las funciones I_i ponderadas. La ponderación se logra introduciendo los factores de peso w_i como exponentes a los cuales se elevan las funciones I_i :

$$NSF\ WQI = \prod I_i^{w_i} \quad (49)$$

A diferencia de los índices de calidad de aire, puede advertirse que el WQI se calcula tomando en cuenta las nueve variables. La Tabla 2.10 muestra la forma de comunicar los resultados, ya sea con un descriptor verbal ("pobre", "bueno", etc) o por un código de colores.

Las aguas clasificadas como excelentes y buenas pueden soportar una alta diversidad de vida acuática, y son apropiadas para todo tipo de recreación y para toma de agua para potabilización. Las de características medias o promedio generalmente poseen menos diversidad de organismos acuáticos, y frecuentemente manifiestan un crecimiento anormal de algas. Aquellas

aguas que caen dentro de la clasificación de regular, sólo pueden soportar una baja diversidad de vida acuática y probablemente experimenten problemas de contaminación. Las aguas dentro de la categoría de pobre sólo pueden soportar un número limitado de organismos acuáticos, y puede esperarse que tengan abundantes problemas de calidad. Normalmente no se considerarían aceptables para actividades que involucren el contacto directo con el agua.

Descriptores para presentar el WQI	Ámbito Numérico	Color
POBRE	0-25	ROJO
REGULAR	26-50	NARANJA
MEDIO	51-70	AMARILLO
BUENO	71-90	VERDE
EXCELENTE	91-100	AZUL

ICA (Tomado de Conesa Fernández-Vítora, 2009).

Este índice proporciona un valor global de la calidad del agua. Para su cálculo Martínez de Bascarán propone la utilización de los siguientes veintitrés parámetros o indicadores: pH, conductividad, oxígeno disuelto, reducción del permanganato, coliformes, nitrógeno amoniacal, cloruros, temperatura, detergentes, aspecto, dureza, sólidos disueltos, plaguicidas, grasas y aceites, sulfatos, nitratos, cianuros, sodio, calcio, magnesio, fosfatos, nitritos y DBO5. Los mismos se seleccionaron de acuerdo con la contaminación existente en el sistema en estudio al que fue posteriormente aplicado (cuencas de España), utilizándose aquellos que fueran los más representativos. Se valoró la importancia conforme al estado de la cuenca y a la experiencia de los profesionales consultados, idóneos en el tema.

Con los 23 parámetros se elaboraron tablas que vinculan el valor analítico encontrado en las muestras de agua con su calidad ambiental expresada en una

valoración porcentual (C_i). La Tabla 2.11 muestra cómo se calcula el valor porcentual a asignar a diez de los parámetros; esos valores porcentuales van desde 0 (pésimo) hasta 100 (óptimo). La Tabla 2.12 muestra los valores de C_i para los restantes 13 parámetros seleccionados por Martínez de Bascarán. Estas tablas también muestran los pesos relativos P_i asignados a cada parámetro. Nótese que en este caso la suma de los 23 valores de P_i es 47.

Luego, a partir de un promedio pesado de las transformaciones de los valores de los indicadores se procede a su evaluación, según se detalla en la siguiente ecuación:

$$ICA = K \frac{\sum C_i \times P_i}{\sum P_i} \quad (50)$$

En esta expresión, el significado de los símbolos es el siguiente:

C_i = valor porcentual (transformado) asignado a los indicadores o parámetros.

P_i = peso asignado a cada indicador o parámetro.

K = constante que toma los siguientes valores:

1,00 para aguas claras sin aparente contaminación.

0,75 para aguas con ligero color, espumas, ligera turbidez aparente no natural.

0,50 para aguas con apariencia de estar contaminada y fuerte olor.

0,25 para aguas negras que presenten fermentaciones y olores.

La clasificación en la que se enmarcan los resultados del índice (entre 0 y 100) se describen en la Tabla 2.13.

Los valores de calidad de los distintos parámetros expresados en la Tabla 2.11 y Tabla 2.12 son genéricos y por tanto susceptibles de conducir a error, cuando se trata de determinar la calidad del agua para un uso específico. Asimismo, el factor K es de apreciación subjetiva, e introduce un alto grado de incertidumbre en el valor final del ICA.

C1	Utilizable para cualquier uso existente.	ICA = 100-93
C2	Utilización limitada. Casi todos los usos con ciertas precauciones, exigiendo tratamientos simples.	ICA = 92-85
C3	Utilización limitada. Usos más restringidos, y tratamientos más sofisticados.	ICA = 84-53
C4	Utilización limitada. Posibles usos mínimos.	ICA = 52-24
C5	Se consideran aguas que no tienen ningún uso.	ICA < 24

Nota: El cuadro fue tomado de Fraire 2005. Contiene información adaptada, tomada del artículo "Una Metodología para definir la Calidad del Agua por un valor numérico" (Martínez de Bascarán, 2005, Inédito)

CCMEWQI (Canadian Council Ministers of Environment Water Quality Index)

El índice de calidad de agua propuesto por el *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME 2001), está basado en el desarrollado y propuesto por el *British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks* (Rocchini y col. 1995). Fue adoptado por varias provincias de Canadá, como por ejemplo, Manitoba en 1997.

En enero de 1997, el subcomité técnico del grupo de trabajo del CCME *Water Quality Guidelines* examinó, alteró e incluyó modificaciones en el índice de British Columbia para crear el *CCME Water Quality Index* para todas las provincias canadienses. El índice fue aprobado en el año 2001.

El índice está basado en la combinación de tres factores: **F1**, Alcance; **F2**, Frecuencia, y **F3**, Amplitud. Estos factores están combinados para producir un único

Tabla 2-11. Valoración Porcentual (ci) de diez de los Parámetros fisicoquímicos y biológicos utilizados por Martínez de Bascarán

Parámetro	pH	Conductividad	Oxígeno Disuelto	Reducción del Permanganato	Coliformes	Nitrógeno Amoniacal	Cloruros	Temp.	Detergentes	Aspecto	C _i
Valor Analítico	1/14	>16.000	0	>15	>14.000	>1.25	>1.500	>50/>-8	>3,00	Pésimo	0
	2/13	12.000	1	12	10.000	1,00	1.000	45/-6	2,00	Muy malo	10
	3/12	8.000	2	10	7.000	0,75	700	40/-4	1,50	Malo	20
	4/11	5.000	3	8	5.000	0,50	500	36/-2	1,00	Desagradable	30
	5/10	3.000	3,5	6	4.000	0,40	300	32/0	0,75	Impropio	40
	6/9,5	2.500	4	5	3.000	0,30	200	30/5	0,50	Normal	50
	6,5	2.000	5	4	2.000	0,20	150	28/10	0,25	Aceptable	60
	9	1.500	6	3	1.500	0,10	100	26/12	0,10	Agradable	70
	8,5	1.250	6,5	2	1.000	0,05	50	24/14	0,06	Bueno	80
	8	1.000	7	1	500	0,03	25	22/15	0,02	Muy bueno	90
7	<750	7,5	<0,5	<50	0	0	21 a 16	0	Excelente	100	
Unidad de Medida	unidad	µmhos/cm	mg/L	mg/L	NMP/100 mL	ppm	ppm	°C	mg/L	Subjetiva	%
P _i	1	4	4	3	3	3	1	1	4	1	-

Los valores analíticos que corresponden a un valor porcentual menor que 50, se entienden como no permisibles.

Tabla 2-12. Valoración Porcentual (ci) de trece de los Parámetros fisicoquímicos y biológicos utilizados por Martínez de Bascarán

Parámetro	Dureza	SD	Plaguicidas	Grasas y Aceites	Sulfatos	Nitratos	Cianuros	Sodio	Calcio	Magnesio	Fosfatos	Nitritos	DBO5	C _i
Valor Analítico	>1500	>20000	>2	>3	>1500	>100	>1	>500	>1000	>500	>500	>1	>15	0
	1000	10000	1	2	1000	50	0.6	300	600	300	300	0.50	12	10
	800	5000	0.4	1	600	20	0.5	250	500	250	200	0.25	10	20
	600	3000	0.2	0.60	400	15	0.4	200	400	200	100	0.20	8	30
	500	2000	0.1	0.30	250	10	0.3	150	300	150	50	0.15	6	40
	400	1500	0.05	0.15	150	8	0.2	100	200	100	30	0.10	5	50
	300	1000	0.025	0.08	100	6	0.1	75	150	75	20	0.05	4	60
	200	750	0.01	0.04	75	4	0.05	50	100	50	10	0.025	3	70
	100	500	0.005	0.02	50	2	0.02	25	50	25	5	0.010	2	80
	50	250	0.001	0.01	25	1	0.01	15	25	15	1	0.005	1	90
	<25	<100	0	0	0	0	0	<10	<10	<10	0	0	<0.5	100
Unidad de medida	mg CO-3Ca/l	mg/l	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	%
P _i	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	3	-

valor que describe la calidad del agua basado en los niveles guía establecidos por la legislación. La ecuación 51 representa la expresión matemática del CCME WQI (CCME 1999).

$$CCMEWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right) \quad (51)$$

En esta ecuación F1 representa el porcentaje de variables que fallan sus objetivos por lo menos una vez, en relación con el número total de variables medidas (ecuación 52).

$$F_1 = \left(\frac{\text{Número de variables que fallaron}}{\text{Número total de variables}} \right) \times 100 \quad (52)$$

F2 representa el porcentaje de pruebas, test o mediciones que fallaron el objetivo respecto del total de mediciones llevadas a cabo, ecuación 53.

$$F_2 = \left(\frac{\text{Número de pruebas fallidas}}{\text{Número total de pruebas}} \right) \times 100 \quad (53)$$

F3 representa en cuánto las mediciones fallidas se alejaron de los objetivos de calidad. Se calcula en tres etapas:

a). El número de veces en que una concentración individual es mayor que el objetivo (o menor, en el caso que el objetivo sea mínimo) se denomina "excursión" y se expresa:

$$excursión_i = \left(\frac{\text{valores superiores}_i}{\text{objetivo}_i} \right) - 1 \quad (54)$$

ii). Cuando el valor no debe caer por debajo del objetivo, mediante la ecuación 55:

$$excursión_i = \left(\frac{\text{objetivo}_i}{\text{valores inferiores}_i} \right) - 1 \quad (55)$$

b). El monto colectivo en que las pruebas individuales están fuera de conformidad es calculado sumando las "excursiones" de las pruebas individuales, dividiéndolas por el número total de pruebas. Esta variable se refiere a la suma normalizada de las "excursiones", o nse (normalización de la suma de excursiones). Se calcula a partir de la ecuación 56:

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n excursión_i}{\text{número total de pruebas}} \quad (56)$$

c). Entonces F3 se calcula con una función que escala la nse para lograr un resultado entre 0 y 100 (ecuación 57).

$$F_3 = \left(\frac{nse}{0,01 \times nse + 0,01} \right) \quad (57)$$

El divisor 1,732 de la ecuación 51 normaliza (escala) el valor resultante del numerador con la finalidad de evitar valores negativos de CCMEWQI. Como antes, un valor de índice de "0" representa la peor calidad de agua y un valor de "100" representa calidad óptima.

Una vez que se han obtenido los factores, el índice se calcula sumando los tres factores como si fueran vectores ortogonales (ver Capítulo 6). La suma de los cuadrados de cada factor es entonces igual al cuadrado del índice. Este acercamiento considera al índice como un vector cuyos tres escalares (en un espacio tridimensional) están definidos por los factores antes descriptos. Con este modelo, el índice es directamente proporcional a los cambios en los tres factores.

Determinado el valor del CCME WQI, se le asigna al resultado una categoría descriptiva. El grupo de trabajo que desarrolló el índice sugiere las categorías a definir como un punto de partida. Los rangos de las mismas pueden ser modificados dependiendo de las variables y objetivos elegidos que, a su vez, variarán de acuerdo al cuerpo de agua, su estado, y las jurisdicciones en donde se apliquen.

La categorización sugerida es la siguiente (Conesa Fernández-Vitora 2001):

- Excelente (WQI = 95-100): la calidad del agua está protegida sin aparente amenazas de contaminación. Las condiciones son cercanas a las naturales, prístinas. Esta categoría sólo puede obtenerse si todas las medidas se encuentran siempre dentro de los objetivos.
- Buena (WQI = 80-94): la calidad del agua está protegida, pero existe una mínima amenaza de contaminación; su condición raramente se aleja de la natural o de los niveles deseados.
- Regular (WQI = 60-79): la calidad del agua está usualmente protegida pero es ocasionalmente amenazada; su condición, algunas veces, se aleja de la natural o de los niveles deseados.
- Marginal (WQI = 45-59): la calidad del agua frecuentemente es amenazada; su condición a menudo se aleja de la natural o de los niveles deseados.
- Pobre (WQI = 0-44): la calidad del agua se encuentra casi siempre amenazada; su condición usualmente se aleja de la natural o de los niveles deseados.

Valoración de los índices de calidad de agua como herramientas de gestión del recurso (Freire 2005)

El índice de EE.UU. y el utilizado por Fernández de Basarán tienen una formulación matemática similar: son un promedio pesado de las funciones generadas para describir los distintos parámetros.

Las funciones de transformación relacionan la magnitud de un factor ambiental (parámetro) y la calidad ambiental del recurso de manera de homogeneizar las diferentes unidades de medida expresándolas en unidades abstractas de valor ambiental. Las funciones de transformación no siempre coinciden y por tanto el resultado final de la transformación difiere en algunos casos en más de un 200 %. El empleo de índices de calidad de agua exige un cuidadoso conocimiento del marco conceptual en el que fue elaborado; puesto que los criterios adoptados para su formulación son distintos. Los factores que inciden para establecer las transformaciones son cuatro:

- El cuidado de la salud
- La legislación nacional
- Las características naturales del recurso en estudio
- La aptitud de uso

A diferencia de los anteriores índices, el de Canadá representa una distancia geométrica entre los objetivos basados en la condición prístina del recurso (en su defecto, los establecidos por la legislación) y el estado del recurso. No requiere de transformaciones para los parámetros que participen de su evaluación y evita la subjetividad de ponderar los distintos parámetros. Por lo tanto resulta más objetivo. Asimismo identifica aquellos parámetros que no cumplen con los objetivos establecidos; la frecuencia con que no cumplen los mismos y la magnitud en que se ha manifestado dicho incumplimiento.

Una vez obtenido el valor del ICA, se procede a cualificar ese valor. Aquí también aparecen diferencias significativas entre los distintos índices.

Los índices de EE.UU. como el de Canadá tienen alcance nacional. El primero fue diseñado concentrándose en la salud pública principalmente, a través de un Delphi que le dio gran protagonismo al juicio profesional. No admite que los parámetros sean modificados de acuerdo a las características específicas del recurso en estudio.

El ICA canadiense se diferencia de todos los restantes nuevamente, dado que no toma parámetros específicos, sino que deja abierta la elección de los mismos al buen juicio profesional, que debe tener en cuenta las características prístinas del recurso. Identifica los parámetros con elevados valores de concentración y tiene en cuenta la periodicidad con que se alejan de lo deseable. No tiene funciones de transformación, ni asignación de peso a los parámetros participantes, lo que lo hace más universal y objetivo (Folguera y col. 2011).

El índice desarrollado por Martínez de Basarán fue aplicado al ambiente estudiado por Freire en la desembocadura del Riachuelo en el río de la Plata. Admite la elección de los parámetros a utilizar en el índice teniendo en cuenta las características específicas

Tabla 2-14. Clases agrológicas

CLASE	I	II	III	IV	V	VI	VII
Pluviometría	>600 mm o riego	600>p>300 o riego	Ídem II	Ídem II y III	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Temperatura	Permite cultivo de maíz	Permite cultivo de cereales en invierno	Ídem II	Ídem II y III	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Pendientes	< 3%	< 10 %	< 20 %	Ídem III	< 3 %	20 < p < 30 %	30 < p < 50 %
Estructura	Equilibrada	Equilibrada	Equilibrada	Equilibrada	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Profundidad	> 90 cm	>60 cm	> 30 cm	> 30 cm	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Pedregosidad < 25 cm superficie cubierta > 25 cm	-	< 20 % < 0,1 %	< 50 % < 0,1 %	< 90 % < 3 %	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Rocosidad	-	< 2 %	< 10 %		Indiferente	Indiferente	Indiferente
Encharcamiento	-	Puede ser estacional	Puede ser estacional	Ídem III	Continua o frecuente	-	-
Salinidad	-	-	Algo	Ídem III	Impide el cultivo	-	-
Erosión	-	Moderada	Moderada	Ídem III	-	Fácil	Fuerte

del recurso estudiado. También atribuye gran importancia al buen juicio profesional, dado que el ICA incluye una constante k ($0 < k < 1$) de apreciación subjetiva.

2.12.3. Índice de Capacidad Agrológica de Suelos

Los índices de calidad de agua definen la aptitud de uso de los cuerpos de agua. Interesa conocer su calidad para los diversos usos del agua que se indican a continuación:

Se define la capacidad agrológica como la adecuación de los suelos a determinados usos específicos. Da información acerca de la aptitud para el cultivo del

terreno y toma en cuenta las limitaciones del mismo respecto a los usos agrícolas, praterales y forestales. La clasificación contempla categorías a tres niveles: unidad de capacidad (agrupamiento de suelos que tienen similares respuestas a sistemas de manejo agrícolas y praterales), subclase de capacidad (agrupamiento de unidades de capacidad que tienen similares riesgos y limitaciones: de erosión (e), exceso de humedad (h), por naturaleza del suelo (s) y de tipo climático (c)) y clase de capacidad (agrupamiento de subclases).

La capacidad del suelo se divide en 7 clases agrológicas (los riesgos de daños al suelo o limitaciones en su uso aumentan desde la clase I a VII). La clasificación se muestra en la Tabla 2.14.

2.13. Bibliografía

Aldabe S., Aramendía P., Lacreu I. (1999). Química I. Fundamentos. Editorial Colihue. ISBN: 950-581-343-0.

Bolea, M. (1984). Evaluación de Impacto Ambiental. MAPFRE, 609 pág. ISBN 8471001381.

Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, B.A., Tayer, R.G. (1970). *A water quality index crashing the psychological barrier*. Water Sewage Works 117, 339-343.

Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001) Canadian Water Quality Guidelines. Publication N°. 1299. ISBN 1-896997-34-1

Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, User's Manual*. En: *Canadian environmental quality guidelines*, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.

CEALC (2000). Evaluación de la sostenibilidad en América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Ver: <http://www.eclac.cl/dmaah/proyectos/esalc/>

Cicerone, D., Magallanes, J., Sánchez Proaño, P., Nader, G., Bedregal, P. (2011). Gestión de la Información Ambiental. ISBN 978-612-00-0616-0. Edición Patricia Bedregal Salas, Lima, Perú. 120 pp.

Conesa Fernández-Vítora V. (2009) Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Mundi-Prensa Libros. ISBN: 8484766195, 9788484766193.

Folguera, L., Magallanes J., Cicerone, D. (2011). Robustez del ICA armonizado para América Latina. En: Propuesta de un Índice de Calidad de Agua para la Región de Latinoamérica y el Caribe. Capítulo X. Pág. 101-114. Edición Patricia Bedregal Salas, Lima, Perú. ISBN 978-612-00-0615-3.

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, R. Van Dorland, 2007: *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. En: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA.

Fraire, B. (2005). Aplicación de los Índices de Calidad de Agua para la Gestión de la Contaminación de la Franja Costera Sur. Caso de estudio: Desembocadura de la Cuenca Matanza Riachuelo en el Río de la Plata. Tesis de Licenciatura en Gerenciamiento Ambiental. Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales.

Kutner, G. (2013). *Sulfur: History, Technology, Applications and Industry*, ChemTech Publishing, Segunda Edición. ISBN 978-1-895198-67-6. 242 páginas.

Ott, W. (1978). *Environmental Indices: Theory and Practice*, Ann Arbor Science Publishers. ISBN: 0250401916, 9780250401918. 371páginas.

Rocchini, R., Swain, L.G. (1995). *The British Columbia Water Quality Index*. Water Quality Branch, Environmental Protection Department, British Columbia Ministry of Environment, Land and Parks. 13 pág.

Quiroga Martínez, R. (2007). Indicadores Ambientales y de Desarrollo Sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe. División de Estadísticas y Proyecciones Económicas, CEPAL, Naciones Unidas. ISBN: 978-92-1-323100-5

USEPA, 2015. *Air quality Index*. United States Environmental Protection Agency. <http://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>.

3. LA VIDA COMO FENÓMENO FÍSICOQUÍMICO

3.1. Introducción

Definir qué es la vida no es un problema sencillo, y tiene aristas de las ciencias naturales, pero también de la Filosofía, de la Religión, etc. Por ese motivo es preferible simplemente enumerar las características que debe reunir una entidad para ser considerada un ser vivo. En síntesis, un ser vivo nace, crece tomando materia y energía del medio ambiente, desecha al ambiente también materia y energía, se reproduce y muere. Para nuestros fines, lo importante es que esas características se logran a través de estructuras fisicoquímicas muy precisas, que participan en reacciones químicas muy controladas. Por ejemplo, la reproducción nos remite al ADN, molécula que es capaz de definir las características de las proteínas que sintetiza un ser vivo. El intercambio de materia y energía con el ambiente nos remite al concepto fisicoquímico de sistema abierto, que no puede sobrevivir en ausencia de ese intercambio. Los seres vivos son estructuras muy complejas, altamente diferenciadas, capaces de realizar distintos procesos en sitios distintos, como lo describen las complejas reacciones químicas implicadas en el metabolismo celular. También poseen una fuerte capacidad de adaptación al medio:

- A través de cambios en el material genético (mutaciones) en busca de respuestas a cambios ambientales de largo plazo.
- A través de la capacidad de regeneración para reponer o reparar los daños que puede sufrir un órgano; la regeneración se logra de nuevo a través de reacciones químicas muy delicadamente controladas.
- A través de la respuesta inmediata ante amenazas ambientales, por ejemplo a través de los mecanismos de dolor, que implican reacciones fisicoquímicas específicas, en las que participan los llamados nociceptores (receptores de estímulos nocivos).

Durante mucho tiempo, desde Carl Nilsson Linæus (Carlos Linneo, 1707-1778) la descripción de los seres vivos se hacía taxonómicamente: se describían las características de forma de cada especie y se buscaban vínculos entre las distintas especies. La importancia del trabajo de Linneo fue enorme; a él se debe, por ejemplo, el término homo sapiens que ubicaba al hombre en su nomenclatura de especies biológicas. Por este motivo se ha dicho que con Linneo comienza de alguna forma la Ecología. Este tipo de análisis fue incluso el que usó Darwin en *El origen de las Especies*, donde introduce la idea de evolución.

El reconocimiento de que la vida tiene bases moleculares es relativamente reciente. Probablemente el punto que marcó el cambio de rumbo fue la dilucidación de la estructura del ADN por Watson y Crick (1953). El surgimiento de la *Biología Molecular* significó una revolución enorme en nuestra forma de comprender cómo funcionan los seres vivos. Todas las funciones vitales son ahora explicadas en término de estructura

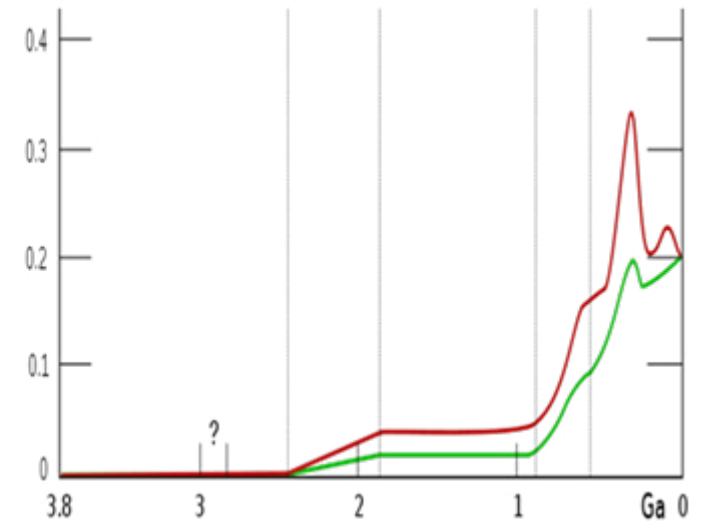
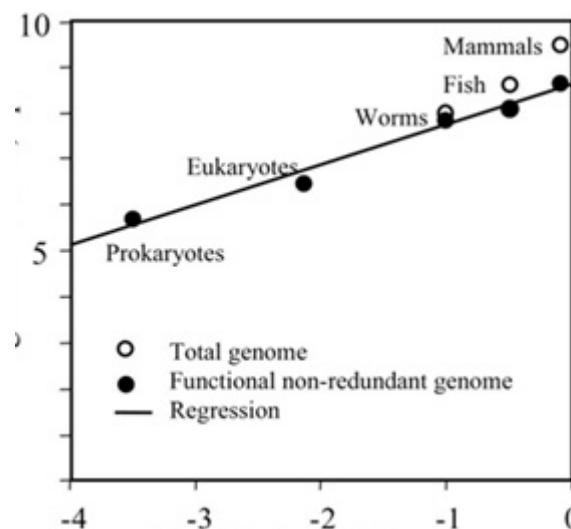
de biomoléculas y de sus reacciones. Debe recalarse que las ciencias naturales como la Biología buscan responder la pregunta ¿Cómo funcionan los seres vivos? y no la más ambiciosa ¿Qué es la vida? que pertenece al campo de la Filosofía o de la Religión.

3.2. Los orígenes de la vida

Como se dijo en *El planeta tierra: su estructura y su balance energético*, se cree que la vida comenzó en el Planeta Tierra hace unos 3.600.000.000 años. Las hipótesis sobre cómo apareció la vida en la Tierra son muchas y muy variadas. Llegan a incluir la hipótesis de origen de la vida en condiciones extraterrestres y muchas variantes de origen en la Tierra: en los ventos hidrotermales del fondo de los océanos, o a través de reacciones químicas en las que intervienen las sustancias presentes en una atmósfera primordial, muy diferente a la actual. En síntesis, son todas hipótesis con algunos basamentos experimentales, pero con

Figura 3-1.

Izquierda: Evolución del logaritmo de la longitud del ADN no redundante en los genomas con el tiempo en millones de años (tomado de Sharov 2006). Derecha: Evolución de la presión parcial de oxígeno en la atmósfera con el tiempo en millones de años: valores estimados en atmósferas, máximos en rojo y mínimos en verde (tomado de Holland 2006).



infinidad de preguntas sin responder. Cualquiera haya sido su origen, las formas de vida originales eran muy sencillas, en comparación con la complejidad de los organismos biológicos actuales. Tomando la longitud del ADN no redundante en los genomas como indicador de la complejidad, la Figura 3-1 (izquierda) muestra la evolución en función del tiempo; debe aclararse que, más que un conocimiento firme, esas figuras representan especulaciones que no son las únicas que se han formulado sobre el tema.

La historia natural de la Tierra en los últimos 3.800.000.000 de años muestra la clara interrelación de los cambios geológicos (en la atmósfera, en el agua de mar y en la composición de los minerales) con la evolución biológica. La Figura 3-1 (derecha) muestra la evolución del contenido de oxígeno en la atmósfera. Existieron eventos cruciales que ilustran bien el juego de la evolución, con factores genéticos y ambientales. En particular, vale la pena mencionar la Gran Oxidación, que describe el cambio drástico en la composición de la atmósfera, causada por la fotosíntesis. Los organismos procariontes, los más sencillos en la Figura 3-1, se caracterizan por no poseer un núcleo rodeado por una membrana. Los responsables de la fijación del grueso del dióxido de carbono que había en la atmósfera original fueron organismos fotosintéticos de este tipo. La misma fotosíntesis generó el oxígeno que remplazó al dióxido de carbono (ver ecuaciones 2.2 y 2.3).

Todos los seres vivos consumen alimentos y desechan los productos residuales. En el caso de los organismos fotosintéticos, el desecho es esencialmente oxígeno, y este oxígeno es tóxico para los organismos anaeróbicos, que proliferaban en las condiciones previas a la Gran Oxidación. En los comienzos de la Gran Oxidación, entre 2.450.000.000 y 2.320.000.000 años atrás, los niveles de oxígeno atmosférico subieron hasta 0,02 y 0,04 atm (entre 15 y 30 mm Hg, probablemente algo más que la décima parte del valor actual). Estos valores alcanzaron para disparar una notable evolución biológica, con la aparición de muchos organismos eucariotas, que poseen membrana celular y pueden ser aeróbicos y tolerar el oxígeno. Finalmente, los organismos superiores, que tienen células eucariotas, aparecieron en paralelo con el nuevo aumento del

contenido de oxígeno atmosférico, en el período que va entre hace 850.000.000 y 540.000.000 años.

Este cambio se vio también reflejado en las propiedades redox del agua de mar y en la composición de los minerales. La transición de condiciones anaeróbicas a aeróbicas fue acompañada por la oxidación de muchos minerales que eran sulfuros metálicos, formando los correspondientes óxidos metálicos y liberando sulfatos a las aguas.

El cambio de la composición atmosférica también contribuyó a generar un drástico cambio climático. En su nueva composición, la atmósfera contenía menos gases de efecto invernadero, como CO₂ o CH₄, y ello originó un enfriamiento que devino en una era glacial muy severa y extensa (la Glaciación Huroniana).

El paisaje actual de nuestro planeta fue moldeado por la actividad biológica, y eso incluye no sólo la aparición de la biota, sino también la naturaleza de los minerales más superficiales, las propiedades químicas de las aguas naturales y la composición de la atmósfera. De nuevo, podemos advertir que nada más lejano de la imagen de inmutabilidad en el planeta: hace 3.600.000.000 apareció la vida; hace unos 2.400.000.000 aparecieron los organismos eucariotas; hace unos 500.000.000 aparecieron los peces; hace 200.000.000, aparecieron los mamíferos; y hace 200.000 apareció el homo sapiens.

¿En qué escala de tiempo podemos esperar los próximos cambios? En el Capítulo 5 bosquejaremos los cambios que parecen estar apareciendo por acción antrópica.

3.3. Las moléculas de la vida

En esta sección describiremos algunas de las moléculas que juegan un papel crucial en la vida: las proteínas, los ácidos nucleicos, las hormonas, las enzimas, etc. Esas moléculas forman parte de un sistema organizado muy complejo que permite sostener la vida.

Los seres vivos tienen fluidos, tejidos blandos y tejidos duros. Los fluidos son soluciones acuosas en las

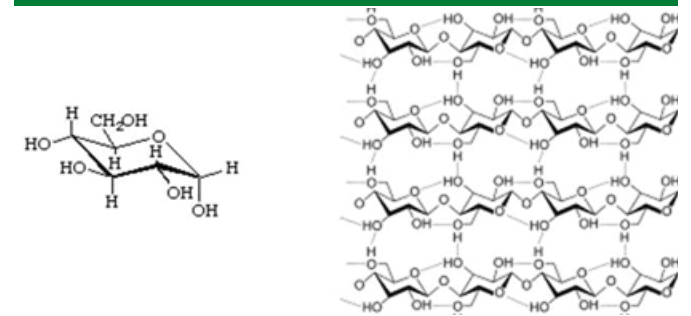
cuales se encuentran suspendidos y disueltos muchos componentes. La sustancia más abundante en los seres vivos es el agua, que representa el 70% de la masa corporal humana y se encuentra asociada no sólo a los fluidos corporales sino también a los tejidos blandos.

Los tejidos duros son muchas veces básicamente sustancias inorgánicas, como el carbonato de calcio (CaCO₃) de las caparazones de muchos organismos acuáticos, o hidroxiapatita, Ca₁₀(PO₄)₆(OH), que es el componente inorgánico de los huesos. Los tejidos duros tienen además sustancias orgánicas, como el colágeno o la celulosa y la lignina de la madera.

La Figura 3-2 muestra la molécula de celulosa. Esta molécula es un polímero, una molécula muy grande formada por unión de moléculas sencillas, los monómeros. En el caso de la celulosa, se trata de un polímero de la glucosa, molécula sencilla que también se muestra en la Figura 3-2. Hay gran diferencia en las propiedades de la celulosa y de la glucosa, y sólo algunos animales, como los rumiantes, son capaces de "desarmar" la celulosa, y generar glucosa para usarla como alimento.

Figura 3-2.

Las moléculas de glucosa (a la izquierda) y de celulosa (a la derecha). Esta última contiene por lo menos 200 unidades de glucosa.

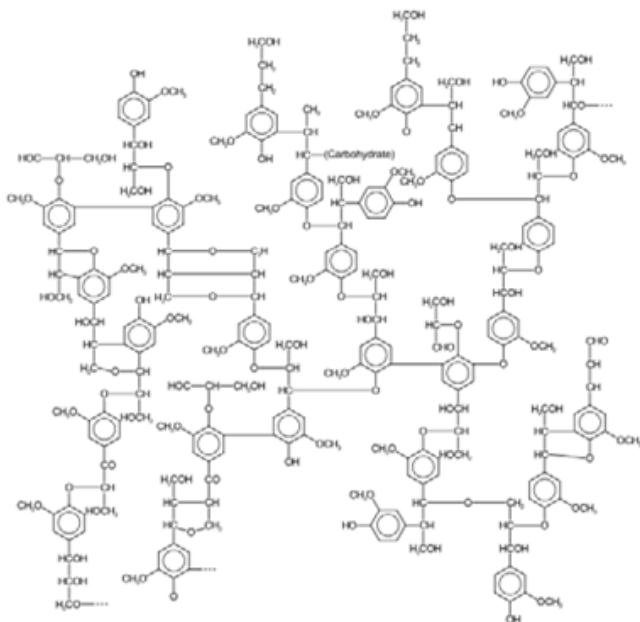


La lignina es otro polímero presente en la madera. Su estructura es mucho más compleja que la de la celulosa, como se muestra en la Figura 3-3. En la obtención de pulpa de papel, es necesario eliminar la lignina, para

dejar sólo las fibras de celulosa.

Figura 3-3.

Una posible estructura de la molécula de lignina.



El colágeno es una proteína (ver más abajo), componente de la piel, los huesos, los tendones y el tejido cartilaginoso. La Figura 3-4 muestra la cadena del colágeno, con tres hélices enrolladas. Los aminoácidos constituyentes más importantes son la prolina y la glicina. La gelatina se puede obtener por desnaturalización del colágeno. La desnaturalización implica la destrucción de la estructura de triple hélice, generando proteínas globulares.

En general, el material biológico está constituido por compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos se basan en la química del carbono, que es muy rica y permite la construcción de moléculas de muy variados tamaños, formas y propiedades. El carbono tiene la capacidad de unirse a sí mismo, formando cadenas en las que hay uniones simples C-C, dobles, C=C y/o triples, C≡C. Las cadenas pueden ser lineales, del

estilo -C-C-C-C-, o cíclicas, como en el benceno (ver

Figura 3-4.

El colágeno

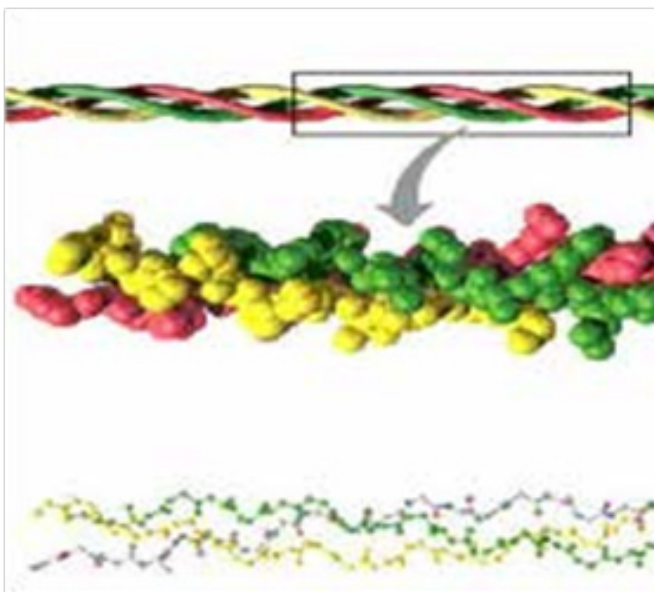


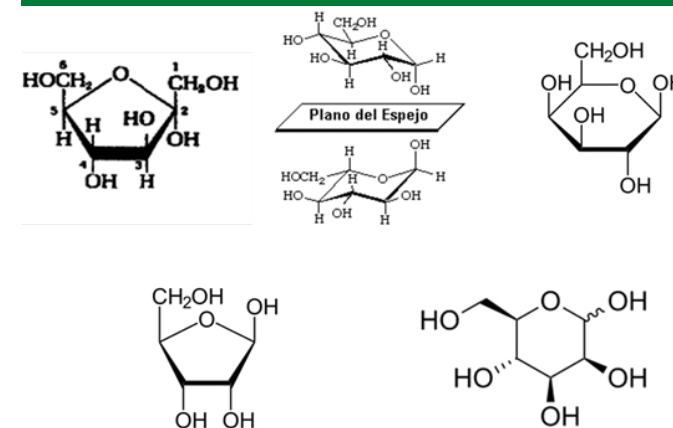
Figura 2-5). Muchas de las moléculas orgánicas de importancia en biología son muy grandes, con miles de átomos. Sin embargo, las mismas están constituidas por unión de monómeros, moléculas pequeñas y sencillas. A continuación describiremos las más importantes de esas moléculas sencillas y de las macromoléculas de alto peso molecular que forman las mismas. A diferencia de los polímeros, las macromoléculas biológicas muchas veces se forman por combinación de varias moléculas sencillas distintas, como veremos más abajo en el caso de las proteínas y de los ácidos nucleicos. Sin embargo también hay macromoléculas biológicas que son polímeros formados por unión de muchas moléculas idénticas, como los polisacáridos que discutimos a continuación.

Carbohidratos. Este nombre hace alusión a su composición elemental. En todas las moléculas de

carbohidratos (o hidratos de carbono) la relación atómica C:H:O es 1:2:1, y por eso se pueden escribir como $C_n(H_2O)_n$. Los carbohidratos incluyen a los *azúcares o glúcidos*, que son en general moléculas pequeñas, y a los polímeros como la celulosa ya mencionada. Las moléculas más sencillas son los *monosacáridos*, que cuando se unen forman primero los *disacáridos*, después los *trisacáridos*, y eventualmente los *polisacáridos* como la celulosa. La Figura 3-5 muestra las moléculas de los monosacáridos de composición $C_5O_5H_{10}$ o $C_6O_6H_{12}$ ($n = 5$ o 6), como la ribosa y la glucosa, respectivamente. La Figura 6 muestra algunos disacáridos como la sacarosa.

Figura 3-5.

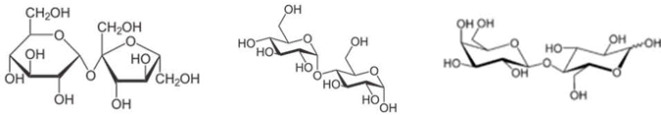
Algunos monosacáridos de cinco o seis átomos de carbono. De arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha: fructosa, glucosa, galactosa, ribosa y manosa. En el caso de la glucosa se ilustra el fenómeno de isomería óptica, al mostrar que una molécula de glucosa no se superpone con su imagen especular. Este tema escapa a este libro, pero es fundamental en la química de los seres vivos, como se discute más abajo.



Capítulo 3

Figura 3-6.

Algunos disacáridos: Maltosa ($C_{10}O_{10}H_{20}$, primero a la izquierda), sacarosa y fructosa ($C_{12}O_{12}H_{24}$, al medio y a la derecha, respectivamente).



Las figuras muestran a las moléculas como anillos; en realidad, una de las uniones C-O puede romperse, y se generan también moléculas que no son cíclicas; por ese motivo, se puede encontrar también en la bibliografía representaciones de estas moléculas sin ciclos.

Ya se ha descrito un polisacárido, la celulosa. Otros polisacáridos son el almidón y el glicógeno (que es un polímero de glucosa, usado para almacenar ésta).

Proteínas. Las proteínas están constituidas por cadenas largas de *aminoácidos* unidos entre sí. Los aminoácidos están formados por moléculas que contienen un grupo amino, por ejemplo $-NH_2$, y un grupo carboxilato, $-C(O)O^-$. Hay veinte aminoácidos que forman todas las proteínas de la mayoría de las especies: alanina, arginina, asparagina, aspartato, cisteína, fenilalanina, glicina, glutamato, glutamina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, prolina, serina, tirosina, treonina, triptófano y valina. Sus moléculas se muestran en la Figura 3-7.

Los aminoácidos pueden unirse entre sí, por reacción entre el grupo amino de uno el carboxilato de otro. Se forman así los péptidos (di-, tri-, polipéptidos) y las proteínas. Es costumbre indicar la secuencia de aminoácidos constituyentes de un péptido o de una proteína indicando sus nombres mediante las tres primeras letras de su nombre inglés. La Figura 3-8 muestra un dipéptido y un tetrapéptido en dos representaciones comunes.

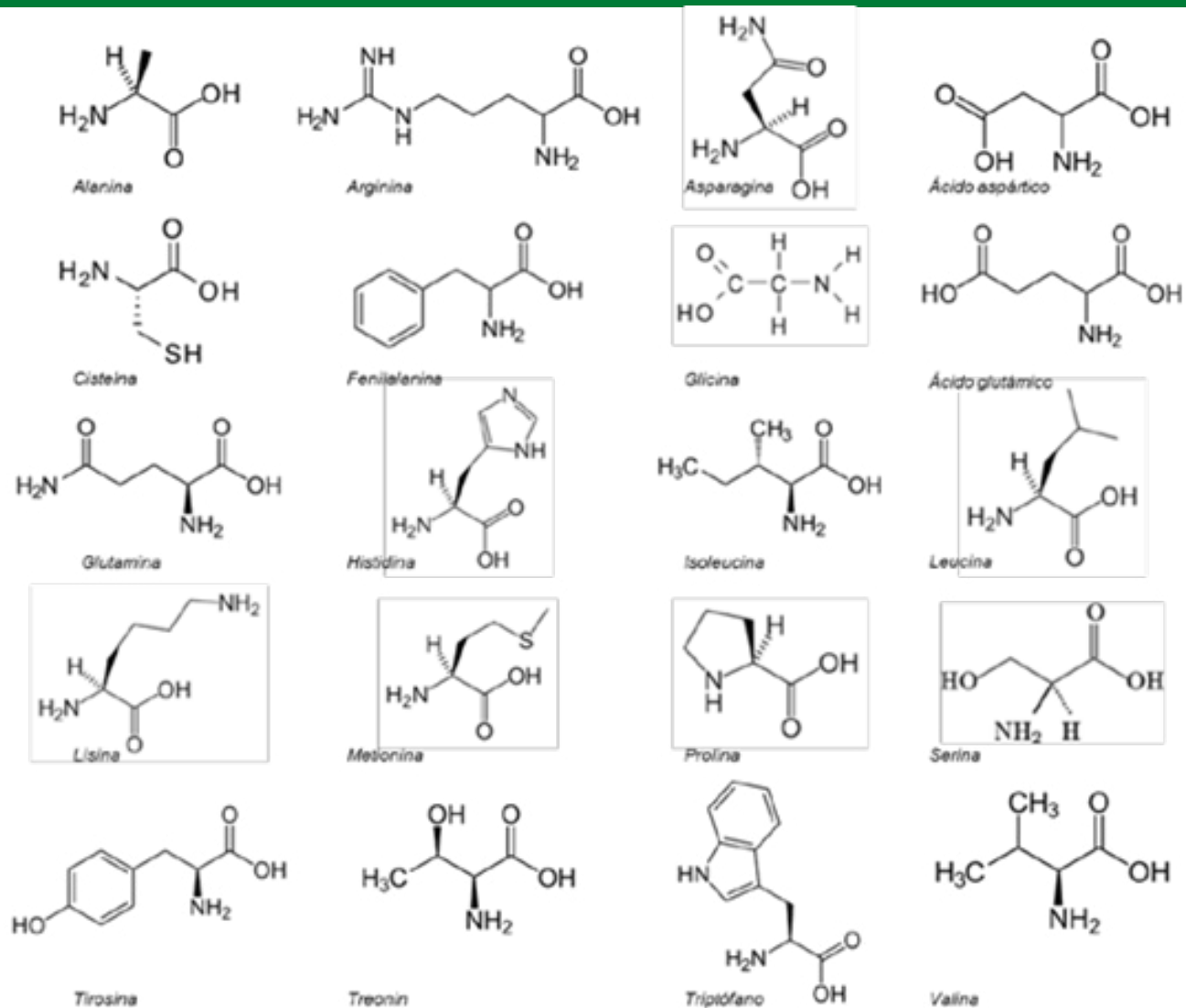
Las proteínas están formadas por un número elevado de aminoácidos. Es usual que estas unidades se dispongan formando cadenas helicoidales, pero también pueden

adoptar formas globulares. Las cadenas proteicas pueden combinarse con otros grupos de distinta naturaleza, como ocurre por ejemplo en el caso de la hemoglobina o de la mioglobina. La primera es la

responsable del transporte de oxígeno en la sangre y la segunda es la que imparte el color rojo a los músculos. Ambas contienen además de la proteína un complejo de hierro (de allí que la hemoglobina resulte de la

Figura 3-7.

Los 20 aminoácidos estándar.

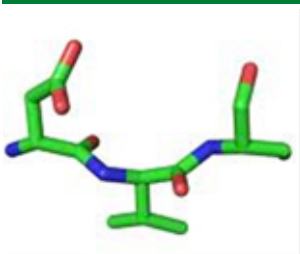


asociación del grupo *hemo*, que contiene al hierro, y de la proteína, de allí *globina*). La cadena proteica de la mioglobina humana tiene un peso molecular de 17.183,8 y su fórmula molecular es $C_{774}H_{1224}N_{210}O_{222}S_5$.

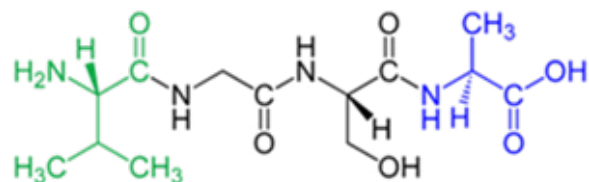
La Figura 3-9 muestra a grandes rasgos las estructuras de estas dos macromoléculas. En la de la izquierda reproducimos la representación de la hemoglobina mostrada en la Figura 2-7; se advierten allí las cuatro subunidades (dos rojas y dos azules) cada una de las cuales tiene un grupo hemo (en verde). En la de la derecha se muestran los dominios helicoidales de la mioglobina, que contiene un solo grupo hemo.

Figura 3-8.

Fórmula química de un dipéptido y un tetrapéptido



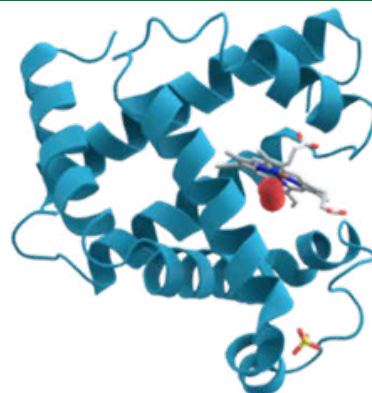
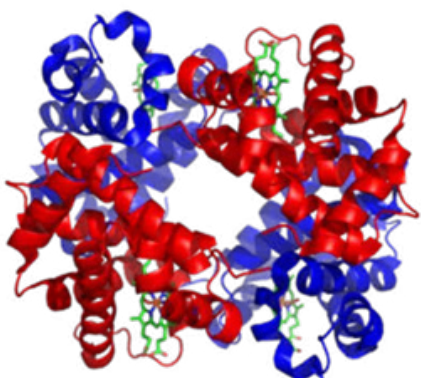
Asp-Val-Ser



Val-Gly-Ser-Ala

Figura 3-9.

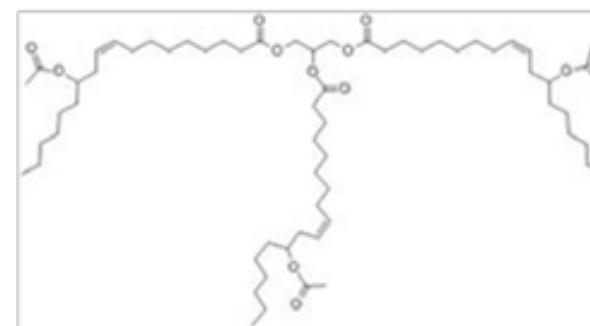
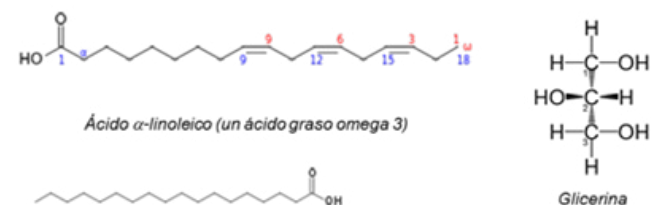
Algunas representaciones de las moléculas de hemoglobina (izquierda) y de mioglobina (derecha).



Lípidos. Los lípidos son sustancias que tienen poca afinidad por el agua – son *hidrofóbicos* – aunque en algunos casos las moléculas pueden tener también regiones *hidrofílicas* (con afinidad por el agua). Estas últimas sustancias se discutirán después. Un grupo muy grande de lípidos lo forman los aceites y las grasas. Desde el punto de vista químico, este grupo son *triglicéridos de ácidos grasos* (los triglicéridos). Resultan de la condensación de la glicerina con ácidos grasos. Según cuál o cuáles son los ácidos grasos involucrados, las grasas incluyen a las grasas saturadas y las no saturadas, y dentro de estas últimas las grasas *trans* y las derivadas de los ácidos grasos omega 3, omega 6 y omega 9. La Figura 3-10 muestra la molécula de glicerina, las de algunos ácidos grasos, y la de algunos triglicéridos.

Figura 3-10.

Ácidos grasos y triglicéridos



Un triglicérido, resultante de la unión de una molécula de glicerina con tres ácidos grasos.

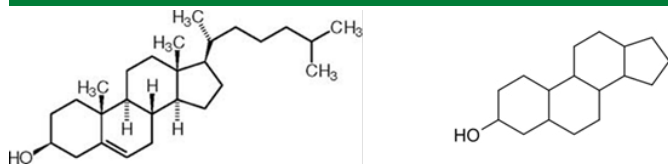
Es interesante notar que en el proceso de obtención de biodiesel, la materia prima son aceites vegetales y en su conversión en combustible se generan grandes cantidades de glicerina como subproducto. La glicerina es un insumo importante de la industria cosmética, y también puede aprovecharse su valor calórico usándola como combustible en la industria. Sin embargo, los altos volúmenes de biodiesel

Capítulo 3

que se producen en la actualidad, especialmente en Europa, pueden generar en el futuro próximo un excedente de glicerina con respecto a la demanda.

Figura 3-11.

Estructura genérica de las moléculas de los esteroides (a la derecha) y molécula de colesterol (a la izquierda)

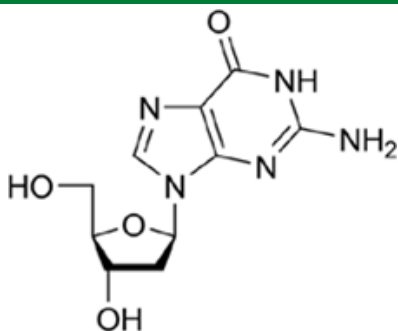


Ácidos nucleicos. El ácido ribonucleico (ARN) está constituido por largas cadenas formadas por eslabones que se conocen como nucleótidos. Los nucleótidos son ésteres que forman el ácido fosfórico con unidades llamadas nucleósidos. Estos nucleósidos resultan de la unión de un azúcar de cinco átomos de carbono (ribosa) y una base nitrogenada (adenina, guanina, citosina o uracilo).

El ácido desoxirribonucleico (ADN) es similar, pero sus nucleósidos se forman a partir de desoxirribosa en lugar de ribosa, y las base nitrogenadas son adenina, guanina, citosina o timina. La Figura 3-12 muestra un nucleótido del ADN, producto de la conjugación de desoxirribosa y guanina.

Figura 3-12.

Desoxiguanosina, el nucleósido formado por la desoxirribosa y la guanosina. Tomado de Wikipedia



A diferencia del ARN, el ADN forma dos cadenas que dan origen a la característica doble hélice que ya mostráramos en la Figura 2-8. Ambas hélices se unen entre sí por uniones de hidrógeno entre las bases de las dos cadenas. El ADN contiene la información necesaria para la síntesis del ARN y de las proteínas, información que se transmite hereditariamente. Los fragmentos de ADN que contienen información específica, por ejemplo para sintetizar una determinada proteína, son los genes. El conjunto de genes es el genoma de una especie.

Cuadro 3-1

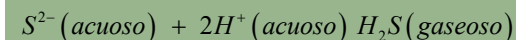
Los productos naturales y su uso por el hombre. Las pasteras y papeleras.

Lógicamente, el hombre recurre a productos naturales de origen vegetal y animal para su alimentación. Azúcar de la caña de azúcar y de la remolacha, proteínas de animales y de la soja, aceites vegetales y grasas animales, etc. pero también usa productos naturales con otros fines. A veces usa esos productos con escasa elaboración, como la madera en la construcción, las pieles para vestimentas o la leña para calefacción y cocción de alimentos. Pero también usa esos productos como insumos en muchas de sus industrias. Por ejemplo, es muy amplio y variado el uso de productos naturales en las industrias farmacéutica y cosmética. Las implicancias en control ambiental de las actividades industriales de alimentos, de medicamentos y de cosméticos son enormes, y varios ejemplos irán apareciendo a lo largo del libro. Aquí vamos a consignar algunos puntos alrededor del uso de la madera para fabricar papel, tema que fue de mucha actualidad y amplio debate no hace mucho en la zona del río Uruguay.

Los papeles, cartulinas y cartones están constituidos por fibras que se obtienen de vegetales. Básicamente la obtención de las fibras es a partir de la madera, aunque también puede obtenerse, por ejemplo, de la caña de azúcar.

Las fibras tienen una estructura tubular terminada en

punta; son huecas y sus paredes están constituidas por celulosa y hemicelulosa (este última, a diferencia de la celulosa, está formada por glucosa). En el vegetal estas fibras están unidas por otro polímero, la lignina. La separación de la lignina se realiza en una operación llamada pulpado. Hay varios procesos de este tipo; el empleado en la planta en Uruguay de UPM apunta a pulpa destinada a la obtención de papel de buena calidad para escritura y documentos, y es entonces un tratamiento para obtener pulpa química blanqueada, de fibra corta, a partir de madera de distintas especies de Eucaliptus. Se usa el proceso kraft, que trata astillas de madera con soluciones acuosas de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio a temperaturas elevadas. Si se recuerda lo dicho en el Capítulo 2, queda claro el origen del olor. Si el agua de proceso se acidifica, puede desprenderse sulfuro de hidrógeno y mercaptanos R-SH, con olor a huevos podridos:



La lignina se disuelve y le confiere al agua el característico color que justifica su nombre de licor negro.

La pulpa de celulosa así obtenida se lava y se blanquea. El blanqueo elimina el remanente de lignina, que es la que le da color marrón al papel. En las pasteras más antiguas se usaba cloro para blanquearla. El cloro ataca a la materia orgánica y puede llegar a generar dioxinas. La preocupación por la descarga de dioxinas al ambiente es uno de los puntos de críticas a la industria de la pasta para papel. Hay dos tipos de tecnologías más modernas. Una de ellas reemplaza el cloro (Cl₂) por dióxido de cloro (ClO₂), con lo cual disminuye sensiblemente la generación de dioxinas; esta es la tecnología más empleada en el mundo, y se utiliza en la planta que la compañía finlandesa UPM compró a Botnia en 2009. Finalmente, existe una tecnología que reemplaza al cloro por ozono, agua oxigenada y/u oxígeno, con lo cual no se pueden generar dioxinas. Esta sustitución tiene un costo económico adicional,

y afecta negativamente la calidad del papel.

El impacto ambiental de la fabricación de pasta de papel se manifiesta en las descargas a la atmósfera (gases olorosos), al agua (compuestos orgánicos de diverso tipo), y al suelo (disposición de residuos sólidos).

Existen además otro tipo de impactos, que tienen que ver con el uso del suelo (impacto visual, Figura 3-13) y de las vías de comunicación fluviales, etc.

Figura 3-13.

A la izquierda, el balneario de Ñandubaysal y la afectación del paisaje por la pastera (tomado de La Nación, 20 de enero de 2008 (ver: <http://www.lanacion.com.ar/980421-la-produccion-de-botnia-no-causo-da-no-ambiental-en-gauleguaychu>). A la derecha ubicación de la planta de UPM en relación con Fray Bentos y Gualeguaychú (Fuente: Google Earth)



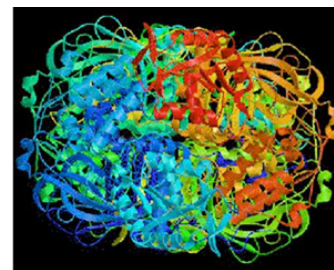
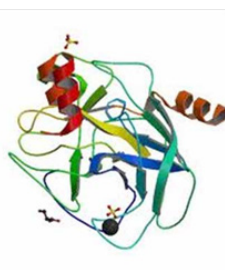
3.4. Las reacciones metabólicas y las enzimas

La complejidad de la química de los seres vivos es extrema. Su existencia depende no sólo de las estructuras que construye con las moléculas que hemos descrito en la sección anterior, sino también del ritmo de las transformaciones químicas que ocurren en el organismo. Las reacciones bioquímicas se caracterizan por una muy alta especificidad: la naturaleza de las moléculas que son transformadas, así como la naturaleza de las moléculas que se forman están muy bien definidas. El organismo logra esta especificidad a través de las *enzimas*. Casi todas las

enzimas son proteínas; la excepción la constituyen las ribozimas, cuyas moléculas están constituidas por ácido ribonucleico. El rol de las enzimas es el de llevar a cabo transformaciones químicas altamente específicas. Por ese motivo, para cada reacción hay una enzima distinta. Se las suele nombrar según la reacción que catalizan, dándole la terminación *asa*. Así por ejemplo, las *proteasas* median la ruptura (hidrólisis) de proteínas. Los mamíferos tienen en el tracto digestivo la *tripsina*, una de las proteasas, que se muestra en la Figura 3-14. Otra enzima muy conocida es la catalasa, que el organismo usa para descomponer el agua oxigenada. Esta enzima puede procesar del orden de un millón de moléculas de agua oxigenada por segundo, evitando su acumulación y posibles efectos tóxicos. La Figura 3-14 también muestra la estructura de la catalasa.

Figura 3-14.

A la izquierda, tripsina bovina. A la derecha, catalasa de *E. coli* (http://www.genomenewsnetwork.org/articles/08_01/Catala-se_snp.shtml).



3.5. Toxicología

La resiliencia de los organismos vivos se basa en su capacidad de responder ante agresiones del medio, y de procesar la gran variedad de sustancias químicas que pueden ingresar al organismo a través del sistema digestivo, del sistema respiratorio o de la piel. Dicha resiliencia puede tambalear por acción de sustancias químicas que, ingresando en el organismo, llegan a compartimentos o ambientes seclusos (apartados y separados) en los cuales interfieren con la especificidad de las reacciones metabólicas, con lo que ponen en riesgo la adaptabilidad y la capacidad de regeneración.

Según Paracelso (1493-1541), el veneno está en la dosis. De allí que toda regulación tendiente a prevenir la exposición a agentes tóxicos deba mencionar la dosis. La exposición a tóxicos ambientales puede ocurrir por inhalación, a través de la piel, o por ingesta. A su vez, los efectos de las sustancias tóxicas pueden ser agudos o crónicos. Los primeros pueden conducir rápidamente a efectos nocivos, incluso la muerte. Desde el punto de vista de la gestión ambiental, no es el caso más importante, excepto en circunstancias de accidentes ambientales severos, como puede ser la explosión de la planta química en Bhopal (India) en 1984. En cambio son de mucha importancia los posibles efectos de largo plazo, producidos por la exposición prolongada a cantidades pequeñas de sustancias tóxicas. De esto último hay ejemplos de tragedias causadas por el hombre, como la liberación de compuestos de mercurio en la Bahía de Minamata, en Japón (ver Cuadro 5-7), y también ejemplos de tóxicos presentes naturalmente, como es el caso del arsénico en las aguas naturales en buena parte del territorio argentino (ver Cuadro 5-1).

De particular importancia es la naturaleza química de las sustancias fabricadas por el hombre y liberadas al ambiente. En el caso de los metales o metaloides, los mismos pueden ir transformándose en distintas especies químicas, pero nunca desaparecen. Por lo tanto, eventualmente generan problemas de disposición final. Un ejemplo claro lo constituye el arsénico en el agua: el Código Alimentario Argentino establece que debe llegarse a contenidos por debajo de 10 µg/L (si hay razones que impidan alcanzar este valor, provisionalmente es aceptable proveer agua que contenga hasta 50 µg/L); un tema de difícil solución es cómo disponer del arsénico retenido por los sistemas de purificación del agua. En el caso de metales liberados al medio por la acción antrópica, existen iniciativas para limitar esta liberación; tal es el caso en particular de plomo y mercurio.

En el caso de las sustancias orgánicas nocivas, su comportamiento químico en el ambiente es crucial. Hay dos aspectos que requieren atención. Por un lado, la degradabilidad, la posibilidad que la sustancia sea degradada por acción de los microorganismos ambientales, de la luz y/o del oxígeno atmosférico. Por

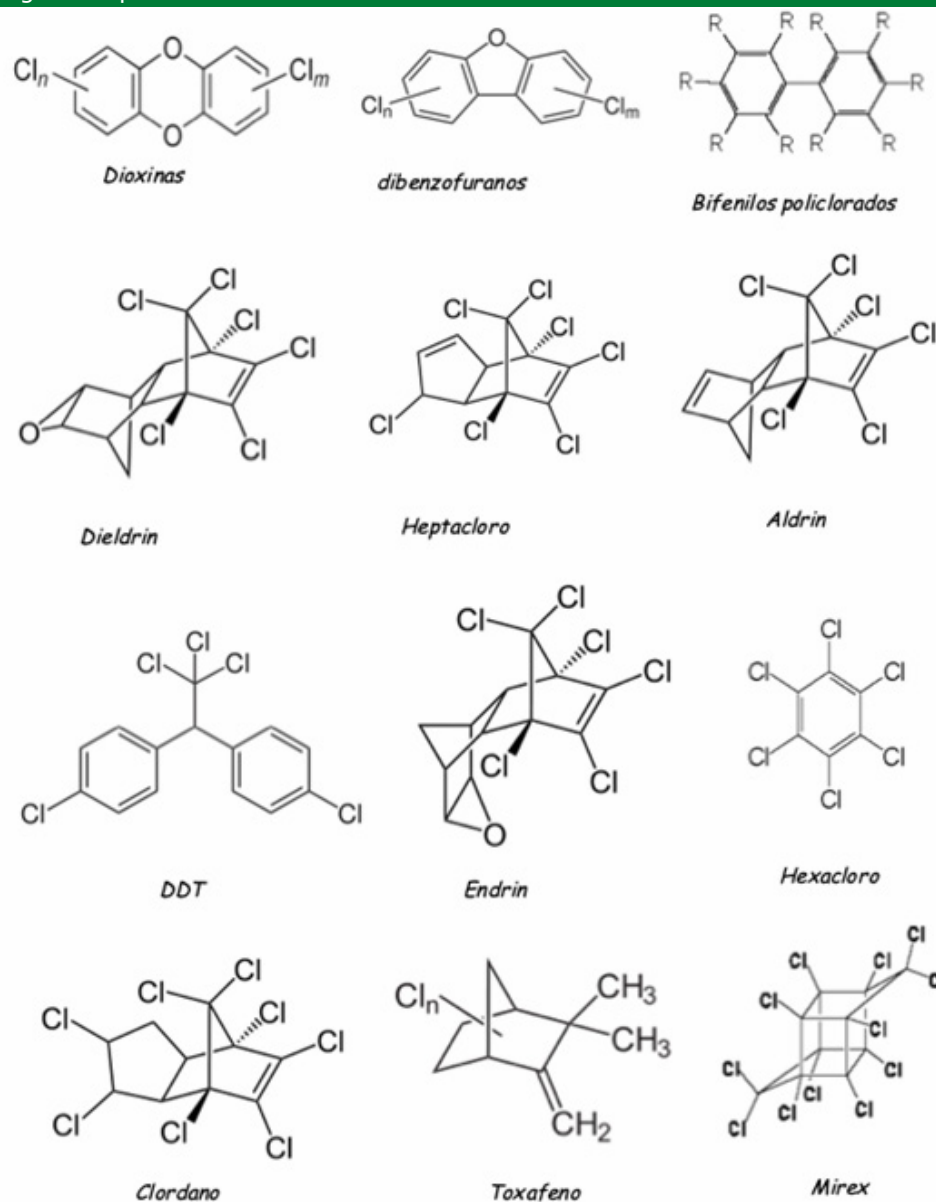
otro lado, la posibilidad de bioacumulación, de forma que se incorporen a la cadena trófica y vayan acumulándose cada vez más en organismos superiores.

Estas propiedades quedan definidas por su estructura química. En particular, la bioacumulación va asociada al carácter hidrofóbico (o lipofílico) de la sustancia. Compuestos muy poco solubles en agua, pero solubles en grasas, como el DDT, tienden marcadamente a bioacumularse. Son especialmente peligrosas las sustancias que no se degradan con facilidad, los llamados compuestos orgánicos persistentes (COPs). La Convención de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes se estableció en 2001 y entró en vigencia en 2004. En el Anexo A de su texto incluye un listado de sustancias que deben eliminarse. El listado original contenía doce sustancias (la docena sucia), y en sucesivas revisiones el número llegó a 21. La Figura 3-15 y Figura 3-16 muestran las moléculas de los compuestos incluidos en el Anexo A. El grupo está compuesto muy especialmente por sustancias orgánicas cloradas, diseñadas originalmente para su uso en agricultura y/o control de plagas.

Los aspectos regulatorios de la Toxicología buscan establecer indicadores que describan el riesgo asociado a la presencia de un determinado contaminante en determinado nivel, y que genera exposición o ingesta durante un determinado tiempo. Para ello es esencial conocer lo que se conoce como relación dosis / respuesta. La Figura 3-17 muestra un ejemplo, referido a una intoxicación masiva con mercurio que tuvo lugar en Iraq en 1971 (Clarkson y Magos 2006; Blesa y Castro 2014). La misma muestra la frecuencia de aparición de efectos nocivos en función de la ingesta total de mercurio. Cada efecto

Figura 3-15.

La docena sucia original de la Convención de Estocolmo sobre compuestos orgánicos persistentes.



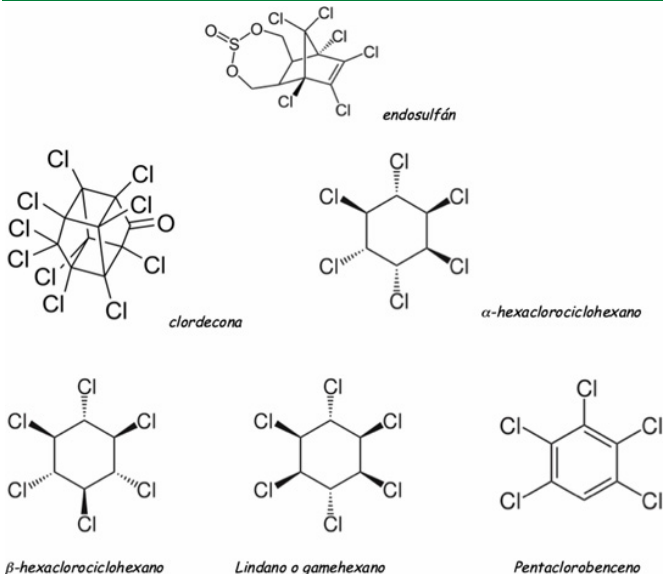
nocivo (parestesia, ataxia, disartria, sordera, muerte) tiene su propia curva de respuesta.

La jerga de las regulaciones toxicológicas es compleja. Cuando se dispone de información sobre los efectos tóxicos en función de la dosis, los organismos pertinentes, como la Organización Mundial de la Salud (OMS o, en inglés, *WHO, World Health Organization*) o la Environmental Protection Agency de EE.UU. (EPA) establecen la llamada dosis de referencia (*RfD, Reference Dose*), que es la máxima cantidad que se puede ingerir con seguridad. Por ejemplo, en el caso del mercurio, la EPA estableció una RfD de 0,1 microgramos diarios por kilo de peso corporal.

De este tipo de análisis surgen los indicadores usados en Toxicología para describir la toxicidad de una determinada sustancia presente en el ambiente (aire, agua, suelo). Entre estos indicadores, cabe mencionar el nivel máximo al que no se observan efectos adversos, NOAEL (*No Observed Adverse Effect Level*), y el nivel más bajo al cual se observan efectos adversos LOAEL (*Lowest Observed Adverse Effect Level*).

Figura 3-16.

Las moléculas de contaminantes orgánicos persistentes incluidos en modificaciones del Anexo A de la Convención de Estocolmo

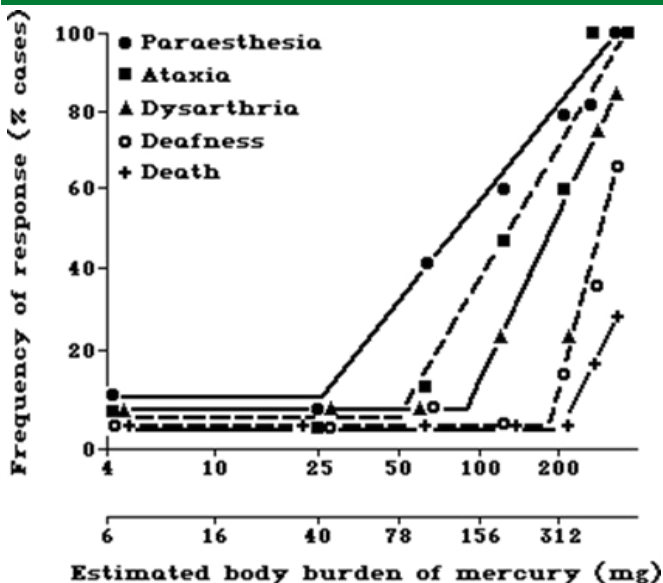


La información toxicológica y epidemiológica es usada por la OMS y otros organismos similares, internacionales y nacionales, para establecer criterios referidos a la exposición e ingesta de tóxicos. Para llegar a estos criterios es necesario transformar los indicadores como concentración de tóxico en pelo o en orina, en indicadores de exposición, como pueden ser la ingesta total semanal, o los niveles del tóxico en el agua de consumo, o en el aire. Por ejemplo, en el caso de la ingesta de mercurio, se ha recomendado el valor provisional máximo de la ingesta tolerable semanal (PWTI, provisional tolerable weekly intake) de 1,6 μ g por kilo de peso corporal; también se ha recomendado una ingesta diaria tolerable (TDI, total daily intake) de mercurio inorgánico de no más de 2 μ g por kilo de peso (WHO 2005). Respecto de la concentración de mercurio en agua de consumo humano, la OMS ha establecido como valor guía provisorio, la cantidad de 0,001 mg/L (1 μ g/L) (cifra redondeada), sobre la base de suponer que la ingesta de ese tóxico por agua es

aproximadamente un 10% de la ingesta total. En el caso de exposición por inhalación, es también necesario definir los tiempos de exposición, o realizar promedios adecuados cuando los niveles en el aire varían en el tiempo.

Figura 3-17.

Curva dosis/respuesta para la intoxicación con mercurio en Iraq en 1971 (tomada de Clarkson y Magos 2006): se presenta la frecuencia de aparición de una determinada respuesta (como porcentaje de los casos estudiados), en función de la dosis recibida en mg de mercurio (escala horizontal superior) y de la carga estimada de mercurio en el organismo en mg de mercurio (escala horizontal inferior). Paraestesia (●), es síndrome más frecuente; ataxia (■); disartria (▲); sordera (○); y, muerte (+).



3.6. Ecología

"Yo soy yo y mi circunstancia y si no la salvo a ella no me salvo yo"

José Ortega y Gasset, *Meditaciones del Quijote*

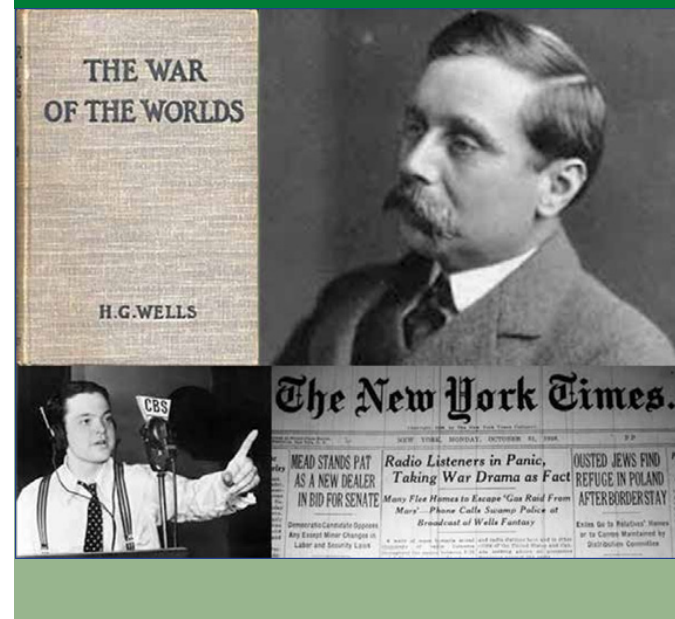
Cuadro 3-2

La Guerra de los Mundos

En 1898 H.G. Wells publica su obra de ciencia ficción *The War of the Worlds* (Figura 3-18). Ese libro marcó un hito en la literatura de ciencia ficción, y fue llevado al cine en más de una ocasión. Para nosotros, el rasgo destacado es que la novela contiene interesantes elementos que prefiguran conceptos ecológicos. En efecto, los invasores marcianos traen consigo el yuyo rojo que es una especie invasiva que se disemina rápidamente a costa de especies nativas. Es más, la derrota final de los marcianos ocurre porque no pueden insertarse en el ecosistema terrestre: las bacterias nativas terminan matando a los invasores.

Figura 3-18.

Arriba: Portada de la primera edición de *The War of the Worlds* y fotografía de su autor. Abajo: Hace 75 años, en 1938, Orson Welles propagaba por la cadena radial CBS una adaptación de esta novela, versión a la que se adjudicó el desencadenamiento de una extrema histeria colectiva.



La Ecología, como rama de la Biología en fuerte interacción con la Geología, es una disciplina relativamente reciente, aunque sus antecedentes pueden rastrearse hasta el siglo XIX. Es la disciplina que estudia los ecosistemas. Un ecosistema está formado por la biocenosis, que es el conjunto de organismos vivos presentes y el biotopo, que es el conjunto de factores abióticos que caracterizan al ecosistema.

Es común también llamar hábitat al biotopo, especialmente cuando el estudio se centra en una determinada especie, más que en la comunidad que forma la biocenosis. La palabra ambiente, o medioambiente, suele describir al conjunto de factores que rodean al hombre: su hábitat, y las demás especies presentes que pueden influir sobre él.

La ecología estudia pues las interacciones entre organismos, y de los organismos con el biotopo, en un ecosistema. Por su naturaleza, la ecología tiene un enfoque holístico, según el cual no puede inferirse el comportamiento del ecosistema a partir del estudio aislado de sus componentes. Esta característica choca con el enfoque habitualmente reduccionista de las ciencias físicas, implícito por ejemplo en la biología molecular.

La versión más extrema de la ecología es tal vez la hipótesis Gaia. El nombre proviene de la diosa griega que representa a la Tierra (nuestra Pachamama, en definitiva). Esta hipótesis visualiza un funcionamiento armónico de toda la biota y su entorno en el Planeta Tierra. Todo el planeta se transforma en un sistema que se autorregula, manteniendo las condiciones requeridas para la vida. Subyace en esta hipótesis la capacidad de los organismos vivos para alterar las condiciones ambientales, y generar condiciones que a su vez definen nuevas posibles formas de vida; el ejemplo más notable es el de la Gran Oxigenación, que ya se mencionó. Hay mucho de cierto en la visión de la íntima interrelación entre la evolución de la vida y la evolución geológica del planeta. En cambio, debe tenerse cuidado con las visiones más extremas de la hipótesis Gaia, que pueden llegar a visualizar al planeta como un único organismo vivo. La Tierra no se reproduce y no intercambia mucha materia con su

exterior; no posee, por tanto, dos características típicas de lo que llamamos vida.

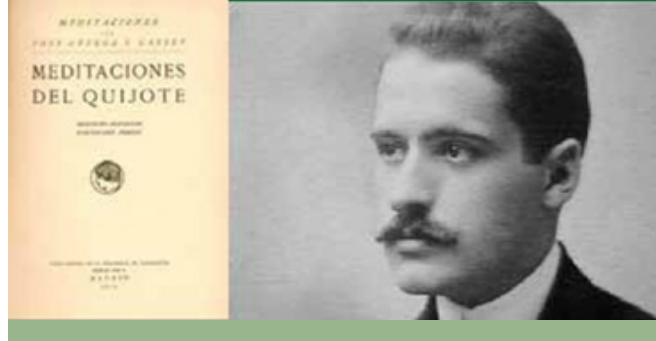
Cuadro 3-3

José Ortega y Gasset

La frase del acápite fue tomada de *Meditaciones del Quijote*, de José Ortega y Gasset, para ilustrar la concepción holística implícita en la ecología, en la mirada ecológica a la relación entre el hombre y el ambiente.

Figura 3-19.

José Ortega y Gasset y la portada de una de las ediciones de *Meditaciones del Quijote*. La edición original es de 1914. Ortega y Gasset no habla tanto del ambiente físico, del hombre como ser biológico; se está refiriendo más bien al devenir histórico, y a su mirada filosófica, el perspectivismo.



Las visiones científicas de la ecología son esenciales para la gestión ambiental, aunque debe advertirse que existen muchas visiones ideológicas que trascienden las fronteras de la ciencia. El reconocimiento de la compleja estructura de los sistemas ecológicos y de las consecuencias de su perturbación son fundamentales para una correcta evaluación ambiental y por lo tanto para su gestión.

En este libro no podemos dar ni siquiera una introducción a la Ecología; describiremos sin embargo dos conceptos centrales: los de *dinámica poblacional* y *biodiversidad*. La *dinámica poblacional*, en un ecosistema, busca

describir cómo evoluciona el número de individuos de cada especie. Se han construido modelos matemáticos para describir estas evoluciones, habitualmente en sistemas idealizados, simplificados. Estos modelos son un conjunto de ecuaciones matemáticas, de las llamadas ecuaciones *diferenciales acopladas*. Un ingrediente casi infaltable en esos modelos es la suposición que la población de una especie, si no tiene limitaciones externas, crece en forma exponencial. El crecimiento exponencial es la descripción matemática de la suposición que la tasa de aumento de la población es proporcional a la población. Matemáticamente, si x es el número de individuos, su tasa de crecimiento, en número de individuos por unidad de tiempo se representa mediante la derivada de x respecto de t , dx/dt . En el caso de crecimiento exponencial de x , dx/dt es proporcional al número de individuos x :

$$dx/dt = kx \quad (58)$$

De la ecuación (58) puede derivarse la relación exponencial entre el número de individuos x y el tiempo:

$$x = x_0 e^{kt} \quad (59)$$

En la ecuación (59), x_0 es el número inicial de individuos (para $t = 0$)

La Figura 3-20 muestra esta ecuación que describe un aumento exponencial de los individuos con el tiempo. Es posible encontrar también representaciones del logaritmo de x con respecto al tiempo. En efecto, de la ecuación (59) se puede deducir que

$$\log x = \log x_0 + kt \quad (60)$$

El logaritmo de x es pues una función lineal del tiempo, tal como puede verse en la Figura 3-21. La pendiente de la recta es simplemente k .

Figura 3-20.

Representación gráfica de x en función de t según la ecuación 59, con $k = 1$, y suponiendo que originariamente, al instante $t = 0$, $x_0 = 1$

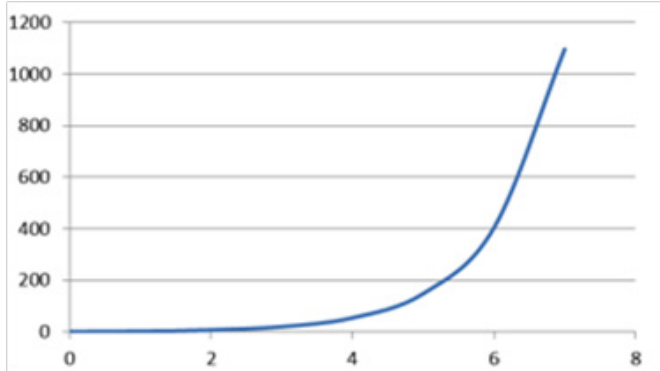
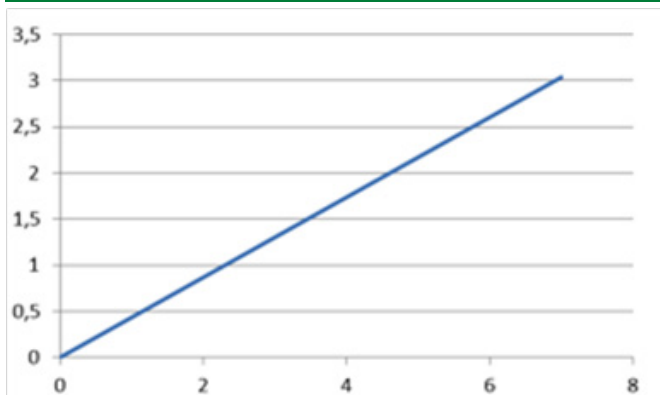


Figura 3-21.

Representación gráfica del logaritmo de x en función de t según la ecuación 60, con $k = 1$, y suponiendo que originariamente, al instante $t = 0$, $x_0 = 1$



Lógicamente, hay limitaciones que truncan el crecimiento exponencial: en primer lugar, las muertes, y también las emigraciones; las inmigraciones, por su parte, se suman los nacimientos para contribuir al aumento poblacional. La constante k de la ecuación (58) puede escribirse así:

$$k = [(n_{\text{nacimientos}} - n_{\text{defunciones}}) + (n_{\text{inmigrantes}} - n_{\text{emigrantes}})] / \text{número de habitantes} \quad (61)$$

En esta ecuación n representa el número correspondiente por unidad de tiempo (por ejemplo, por año). Mientras que en países como India, las migraciones son minúsculas comparadas con la tasa de reproducción, en los países europeos ocurre al revés. Por ejemplo, para España en el primer semestre de 2014, $n_{\text{inmigrantes}} = 156.066$, $n_{\text{emigrantes}} = 206.492$, $n_{\text{nacimientos}} = 208.791$ y $n_{\text{defunciones}} = 206.511$, de forma que k resulta ser negativo. Como el número de habitantes era 46.464.053, $k = -48.146/46.464.053 = -0,104\%$. (la población disminuyó en esos seis meses en algo más de 1 habitante por cada 1000).

En dinámica poblacional, es común que la fase exponencial descrita por la ecuación (59) sea válida solo en una etapa intermedia, después de que se ha superado una fase inicial, y solo hasta que se alcanza una situación en las que las muertes y emigraciones compensan los nacimientos y las inmigraciones. La ecuación sencilla que reemplaza a (58) en esta situación es:

$$dx/dt = kx - k'x^2 \quad (62)$$

La ecuación (62) introduce un término a la derecha que se resta y que es proporcional a x^2 . La interpretación más sencilla es que ese término describe las limitaciones que surgen por escasez de alimentos cuando las poblaciones aumentan mucho. Es común escribir $k' = k/K$, y la magnitud K toma un significado importante: mide la capacidad del sistema para sostener la vida (llamada capacidad de persistencia, o carrying capacity en inglés); cuanto mayor es K , mayor es la población límite que puede soportar el ambiente.

La ecuación (62) suele escribirse como se indica en (63) y se conoce como la ecuación de Verhulst:

$$dx/dt = kx(1 - K^{-1}x) \quad (63)$$

Esta ecuación nos indica cómo va variando la tasa de

crecimiento. De ella se deduce la ecuación (64) que muestra como evoluciona la población en el tiempo:

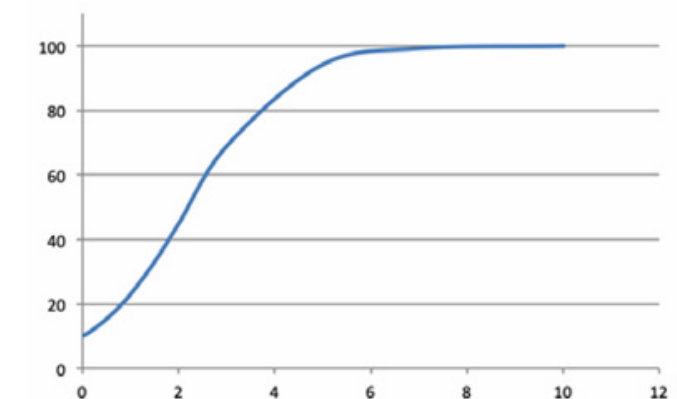
$$x = Kx_0e^{kt} / [K + x_0(e^{kt} - 1)] \quad (64)$$

Matemáticamente, esta ecuación es un caso particular de una ecuación muy importante, la ecuación logística.

La Figura 3-22 muestra esta ecuación, para $k = 1$ y $K = 100$ si la población inicial es $x_0 = 10$.

Figura 3-22.

Representación gráfica de x en función de t según la ecuación 64, con $k = 1$, $K = 100$ y $x_0 = 10$. Nótese que $K (=100$ en este ejemplo) es el valor máximo que puede alcanzar x a tiempos largos.



En cualquier ecosistema, las tasas de nacimiento, de muertes, de emigración e inmigración dependen de toda la estructura del ecosistema. En particular, es obvio que las tasas de nacimiento dependen de la disponibilidad de alimento, y que las tasas de muerte dependen también de esta disponibilidad, y de la existencia de predadores que se alimenten de la especie en análisis.

El modelo más antiguo y más sencillo que describe la influencia de la relación predador/presa sobre la dinámica poblacional es el de Lotka, desarrollado también, casi simultáneamente, por Volterra (Figura 3-23). Llamando x al número de individuos de la

presa, e y al número de individuos del predador, las dos ecuaciones diferenciales acopladas que describen la evolución de las poblaciones de presas x y de predadores y en el modelo de Lotka-Volterra son:

$$dx/dt = Ax - Bxy \quad (65)$$

$$dy/dt = Cxy - Dy \quad (66)$$

Estas dos ecuaciones constituyen un ejemplo sencillo de ecuaciones diferenciales acopladas, el ingrediente principal de todos los modelos matemáticos usados no solo en Ecología, sino también en Economía, Sociología, Meteorología, etc. La ecuación (65) muestra que la población de presas aumenta por nacimientos⁹, que son proporcionales al número de presas (Ax) y desaparecen por acción de los predadores (Bxy). A su vez, la población de predadores aumenta si hay presas (Cxy) y disminuye en ausencia de presas ($-Dy$).

Figura 3-23.

Alfred Lotka (1880-1949), autor de *Elements of Physical Biology* (1925) y Vito Volterra (1860-1940), autor de *Variazioni e fluttuazione del numero d'individui in specie animali conviventi* (1927)

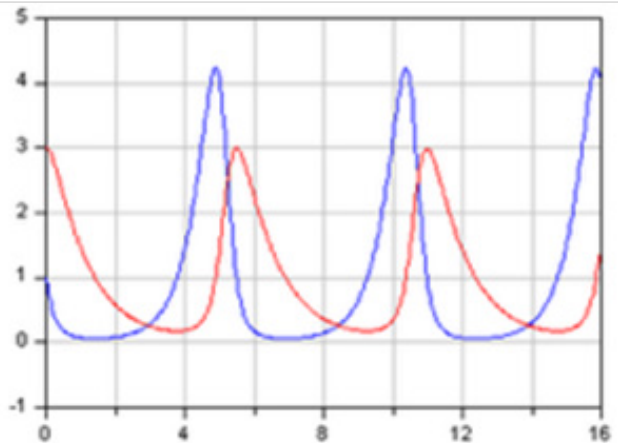


9. Más correctamente, por la diferencia entre el número de nacimientos y el número de muertes.

No describiremos en más detalle este modelo matemático. Solo diremos que, dependiendo de los valores de A , B , C y D , las poblaciones de presa y de predador pueden oscilar; la Figura 3-24 muestra un ejemplo de cálculos realizados con esta ecuación. Un aumento de la población de presas va seguido, con un desfase, por un aumento de la población de predadores y la consiguiente disminución de la población de presas. Esta disminución, a su vez, desencadena una disminución de la población de predadores, etc., etc. El modelo de Lotka-Volterra es una simplificación extrema de la dinámica poblacional en sistemas ecológicos, pero sirve para ilustrar las ideas básicas.

Figura 3-24.

Variación temporal de la población de presas (en azul) y de predadores (en rojo). Las poblaciones iniciales son arbitrarias; también son arbitrarias las unidades de población y de tiempo



¿Cómo responde un ecosistema a una perturbación, por ejemplo a un cambio climático, o a la aparición de sustancias xenobióticas, sintetizadas por el hombre? Un ejemplo interesante lo provee el modelo propuesto por Andrew Watson y James Lovelock (1983), el llamado "Mundo de Margaritas" (o Daisyworld). El modelo propone un mundo imaginario, poblado solo por margaritas blancas y margaritas negras. La diferencia importante entre ambas es que las primeras reflejan

la luz, y las segundas la absorben, transformándola en calor. Imaginemos una situación de estado estacionario en la que la absorción y la reflexión de la luz ocurren en grado tal que la temperatura se mantiene estable. A continuación, ocurre una perturbación en la actividad del sol, que hace incrementar la cantidad de energía radiante que llega al planeta. La respuesta ecológica consistiría en un aumento de la población de margaritas blancas, y una disminución de la población de margaritas negras, con lo que el exceso de radiación sería devuelto y se podría mantener constante la temperatura. A la inversa, si disminuye la cantidad de radiación que llega del sol, aumentaría la población de margaritas negras. En otras palabras, la comunidad ecológica, margaritas blancas más margaritas negras podría enfrentar el cambio ambiental mejor que cualquiera de las dos poblaciones aisladas. Si aumentamos más la complejidad de este sistema ecológico extremadamente simple, se robustece la respuesta: el sistema se vuelve cada vez más estable, porque posee cada vez más mecanismos de respuesta a la perturbación ambiental. De allí que la diversidad biológica provea una estabilidad importante a los sistemas y, a la inversa, la pérdida de biodiversidad puede jugar un papel desestabilizador para los sistemas ecológicos.

3.7. Biodiversidad y dinámica poblacional

Ya se mencionó que la vida apareció hace unos 3.600.000.000 años. Por su parte la Figura 3-1 de este Capítulo muestra que, por un lado, la complejidad de los organismos fue aumentando y que, por el otro, hubo cambios drásticos en el ambiente causados por la propia actividad biológica. Es posible reconstruir la historia de la biología usando los registros fósiles presentes en los sedimentos, y los resultados demuestran que no sólo los individuos mueren, sino también las especies, los géneros, las familias se extinguen (el Cuadro 3-4 explica qué son las especies, los géneros, etc.). La extinción de especies es un fenómeno muy generalizado: se estima que el 99,9% de todas las especies que alguna vez existieron se extinguieron.

Cuadro 3-4

Taxonomía

Linneo estableció los métodos de clasificación y ordenamiento de los individuos biológicos. La base de la clasificación es la similitud de algunas características. Es así que una especie es el conjunto de individuos muy similares; en organismos superiores, como el hombre, los individuos de una especie son capaces de cruzarse entre sí y reproducirse. Ese criterio pierde validez en organismos más sencillos, de reproducción asexual. En estos casos la especie queda definida por la similitud del material genético. A su vez, según su parecido, las especies se agrupan en géneros, los géneros en familias, las familias en órdenes, los órdenes en clases, las clases en filos, y éstos en reinos, aunque la clasificación detallada acepta otros muchos niveles intermedios. En la actualidad se acepta la clasificación de todos los seres vivos en seis reinos: *bacteria*, *protozoa*, *chromista*, *fungi*, *plantae* y *animalia*. Para dar un ejemplo, este último reino se compone de 39 filos, uno de los cuales es chordata. Este filo a su vez se compone de diversos subfilos, a su vez compuestos por clases. Una de las clases es mammalia, la que es subdividida de manera compleja. Una de las órdenes dentro de mammalia es la de los primates, y dentro de ésta está la familia homidae, que a su vez contiene al género *Homo*. En la actualidad, este género contiene solo una especie, el homo sapiens. Todas las otras especies de este género están extintas, como el homo neanderthalensis, que se extinguió hace unos 30.000 años.

La Taxonomía agrupa organismos relacionados entre sí en taxones. La vinculación entre los distintos organismos de un taxón puede ser morfológica (escuela fenética) o, más usado actualmente, el parentesco filogenético que los vincula con un ancestro común (escuela cladística). Los registros fósiles de los distintos estratos geológicos sirven para identificar taxones correspondientes a especies extintas.

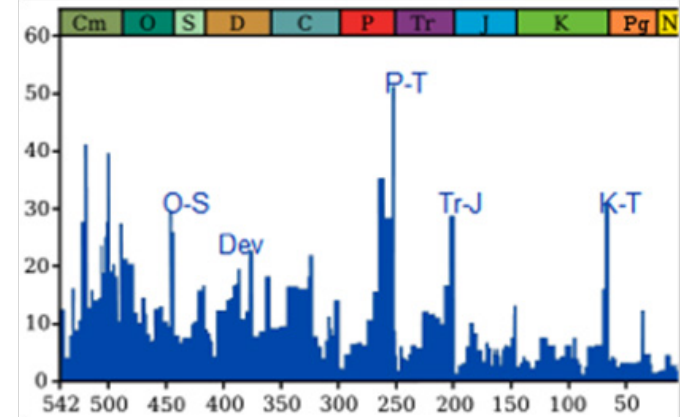
Los registros fósiles de animales marinos se vuelven abundantes durante el eón Fanerozoico, que abarca los últimos 550 millones de años (ver Figura 1-2). Dichos registros demuestran que a lo largo del eón se extinguieron numerosas familias de organismos marinos. En todos los registros estratigráficos se observan especies, géneros y familias que se extinguieron en los años correspondientes a ese registro. Los resultados se muestran en la Figura 3-25. Se destacan cinco eventos de extinción masiva, señaladas en la figura, y que tuvieron lugar en los periodos geológicos Ordovícico-Silúrico (O-S), Devónico (D), Pérmico tardío (P-T), Triásico-Jurásico (Tr-J) y Cretácico tardío (K-T).

Para la gestión ambiental es importante reconocer que los factores ambientales son responsables de las extinciones masivas. Respecto de las extinciones menores, los factores ambientales también juegan un papel, aunque es posible que en este caso haya también factores puramente biológicos involucrados. Se asocian las extinciones masivas con eventos ambientales extremos: ya se mencionó el impacto de un meteorito en Yucatán como causa de la extinción de fines del Cretácico (ver Cuadro 4-3). Entre otras causas que se han barajado, se puede mencionar actividad volcánica extrema, liberación brusca de metano atrapado en el mar (hipótesis del fusil de clatratos de metano), disminución del nivel del mar, anoxia en el agua de mar (reducción drástica del oxígeno disuelto), explosiones de supernovas, etc.

También es importante entender las causas que pueden conducir a extinciones menores. En la actualidad aceptamos como paradigma que cuanto mayor sea la biodiversidad, más estable es el ecosistema y mejores servicios provee (ver *Mundo de Margaritas*, en la Sección 3.5). Los factores que definen la extinción de especies se analizan con modelos matemáticos que van desde relativamente simples hasta muy elaborados, y que guardan muchas similitudes con los modelos de dinámica poblacional discutidos en esta sección.

Figura 3-25.

Fracción de géneros que se extinguieron en cada intervalo durante el Fanerozoico. El eje horizontal es el tiempo en millones de años. Fuente: wikipedia, (<http://es.wikipedia.org/wiki/Extinci%C3%B3n>) con datos originales de Raup y Sepkoski (1982). Ver también Newman y Palmer (1999).

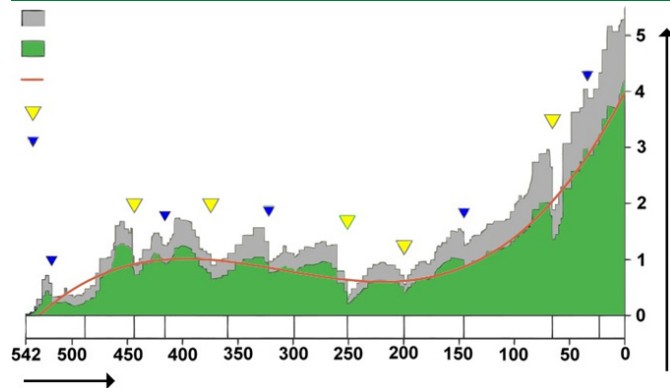


Es importante reconocer que las extinciones son sólo una cara del tema de la evolución de la biodiversidad: la aparición de nuevas especies es constante. En particular, la biodiversidad aparente (la de los registros fósiles marinos) ha ido aumentando mucho durante el Cretácico, el Paleógeno y el Neógeno, como muestra la Figura 3-26; la excepción la constituye la quinta extinción masiva, después de la cual volvió a aumentar la biodiversidad. Sin embargo, los autores de este análisis aclaran que el origen del aumento en tiempos recientes puede reflejar simplemente la mayor disponibilidad de registros, más que un aumento real (Rohde y Muller, 2005). Más que enfocarse en la aparente tendencia global, los autores sugieren que la evolución de la biodiversidad puede ser cíclica, con periodos de 62 millones de años, influida por factores biológicos intrínsecos, o por factores ambientales.

En el Capítulo 4 analizaremos la posible existencia de una sexta extinción masiva, causada por la actividad humana (Sección 4.4.4).

Figura 3-26.

Evolución de la biodiversidad marina aparente durante el Fanerozoico. La escala vertical muestra el número de géneros (en miles). La escala horizontal muestra el tiempo en millones de años hacia el pasado. El área en verde corresponde a géneros bien resueltos, y el área en gris + verde a todos los géneros. Las cinco extinciones masivas se muestran con triángulos amarillos, y los triángulos azules muestran otros episodios de extinción. Fuente: Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Phanerozoic_biodiversity_blank_01.png.



3.8. Bibliografía

Blesa M.A., Castro G.D. 2015. Historia Natural y Cultural del Mercurio, www.aargentinapciencias.org.

Clarkson T.W., Magos L. 2006. *The Toxicology of Mercury and Its Chemical Compounds*. Critical Reviews in Toxicology, 36, 609–662.

Holland H.D. 2006. *The oxygenation of the atmosphere and oceans*. Philosophical Transactions of the Royal Society. B 361, 903–915; doi: 10.1098/rstb.2006.1838
 Koshland Jr. D.E. 2002. *The seven pillars of life*, Science 295, 2215–2216.
 Newman M.E.J., Palmer R.G. 1999. *Model of Extinction*. A Review. <http://arxiv.org/pdf/adap-org/9908002v1.pdf>.

Raup D., Sepkoski J. (1982). *Mass extinctions in the marine fossil record*. Science 215, 1501–1503. Rohde

R.A., Muller R.A. (2005). *Cycles of fossils diversity*, Nature 434, 208–210.

Sharov A.A. 2006. *Genome increase as a clock for the origin and evolution of life*. Biology Direct 1, 17.
 Ver: <http://www.biologydirect.com/content/1/1/17>

Watson J.D, Crick F.H.C. 1953. *Molecular Structure of Nucleic Acids*. A structure of deoxyribose nucleic acid. Nature N° 4356, 737–738.

Watson A.J., Lovelock J.E. 1983. *Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld*. Tellus B 35, 286–289.

4. ACTIVIDAD HUMANA Y EL PLANETA: EL ANTROPOCENO

4.1. Dinámica de la evolución de la población humana

Podemos, pues, sentar como cierto que cuando no impide ningún obstáculo, la población va doblando cada 25 años, creciendo de periodo en periodo en una progresión geométrica.

Ensayo sobre el Principio de la Población, T. R. Malthus Traducción española, Madrid, 1846

En el capítulo anterior presentado ecuaciones que pueden describir la evolución de la población de una especie. Es importante compararlas con las características de la evolución de la población humana. Las ecuaciones eran:

$$dx/dt = kx \quad (58)$$

$$x = x_0 e^{kt} \quad (59)$$

$$dx/dt = kx - k^2 x^2 \quad (62)$$

A estas ecuaciones se le debe sumar la ecuación (64), derivada de la (62), y que ahora reescribimos usando una notación más simple:

$$x = (A / (A + e^{-kt})) \quad (64)$$

Las ecuaciones (58) y (59) describen el crecimiento exponencial. Según estas ecuaciones, si k es constante, la población se duplica en períodos constantes de tiempo; el tiempo necesario para duplicar la población desde un valor x_1 a $2x_1$ (para cualquier valor de x_1) es $0,693/k$. Para Malthus, ese tiempo es 25 años, y k es por lo tanto $0,0277$ años⁻¹. Es común mencionar la tasa de crecimiento anual de la población, por ejemplo 1,2%. Esta tasa de crecimiento anual no es más que 100 veces k . En los números de Malthus está implícita

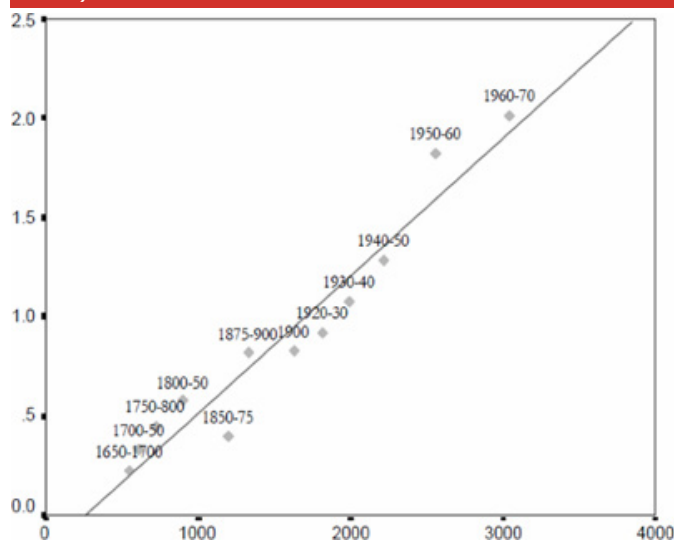
una tasa de crecimiento anual de 2,77%.

Las ecuaciones (62) y (64') describen la limitación a ese crecimiento a tiempos largos, por ejemplo por disponibilidad de alimento.

La evolución de la población humana no sigue estas ecuaciones. En el registro histórico, k aumentó en forma aproximadamente proporcional con la población. La Figura 4-1, tomada de Korotayev y col (2006), muestra la evolución de la tasa porcentual de crecimiento anual en función de la población y de los años, desde el siglo XVII hasta el siglo XX.

Figura 4-1.

Tasa porcentual anual de crecimiento poblacional global desde 1650 hasta 1970 en función de la población (en millones) (Tomado de Korotayev y col. 2006).

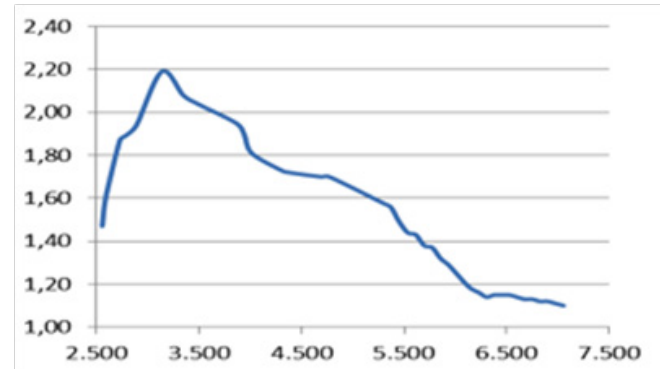


En cambio, en tiempos recientes, la evolución fue diferente. Entre 1950 y 1962, k también aumentó, pero a partir de esa fecha, k disminuyó con el aumento poblacional, tal como se muestra en la Figura 4-2. En este gráfico se han eliminado valores de ciertos años, que muestran fluctuaciones importantes con respecto a

la tendencia señalada.

Figura 4-2.

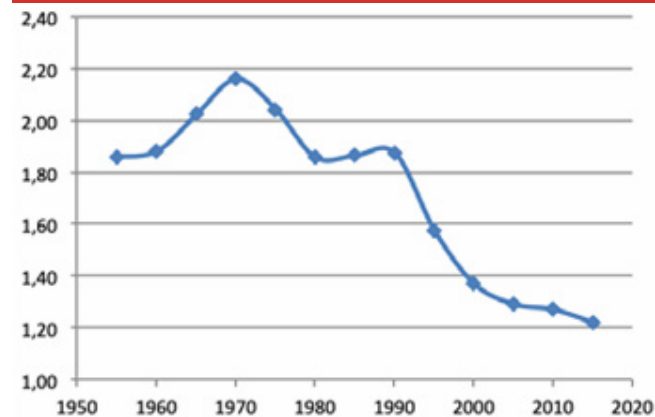
Tasa de crecimiento poblacional anual global (en %) en función de la población (en millones de personas): Fuente principal: Korotayev y col. 2006.



La misma información puede presentarse en función del tiempo, como lo muestra la Figura 4-3.

Figura 4-3.

Tasa anual de crecimiento de la población (promediada quinquenalmente) desde 1955 hasta 2015. Fuente: Elaboración propia de datos tomados de World Population Prospects 2017 (United Nations Population Division), <https://population.un.org/wpp/>



El origen de la notable variación de la tasa de crecimiento de la población humana debe buscarse en las características peculiares del hombre como especie biológica: su capacidad de enfrentar posibles predadores, su independencia de la disponibilidad de presas (especialmente a través del desarrollo de la agricultura y la ganadería), su capacidad para prolongar la vida a través de la salud pública y la fuerte influencia de los factores sociales. Estos últimos pueden conducir por ejemplo a un período de bonanza especial con aumento de tasa (como la posguerra), o a la toma de decisiones políticas que tienden a limitar la natalidad, como ocurre en la actualidad. Estas decisiones son las que justifican un análisis diferenciado de los crecimientos de población en países más desarrollados y en los menos desarrollados. La Figura 4-4 muestra las proyecciones de crecimiento de la población mundial hasta 2100 discriminada en regiones más y menos desarrolladas. La información mostrada corresponde a una hipótesis de crecimiento intermedia ("medium variant"), de los tres posibles escenarios de crecimiento de la población mundial analizados por las Naciones Unidas: ver Figura 4-5. Ya en 2015 la tasa de crecimiento anual de las regiones más desarrolladas cae por debajo del 0,1%, mientras que en las regiones menos desarrolladas la tasa sigue por encima de ese valor aun en 2100.

Para describir matemáticamente el comportamiento mostrado en la Figura 4-1, podemos modificar la ecuación (58) introduciendo la equivalencia $k = k' x$. Obtenemos así la ecuación (67):

$$dx/dt = k'x^2 \quad (67)$$

En estas condiciones, la ecuación (59) es remplazada por la (68):

$$x = x_0 / (1 - k''(t - t_0)) \quad (68)$$

La Figura 4-6 muestra el comportamiento de esta ecuación, usando $x_0 = 1$, $k'' = 1$ y $t_0 = 0$. Para $t = 1$, el valor de x diverge: tiende a infinito.

Figura 4-4.

Tres posibles escenarios de crecimiento de la población mundial hasta 2100. El eje vertical muestra la población en millones de personas. Fuente: World Population Prospects 2017

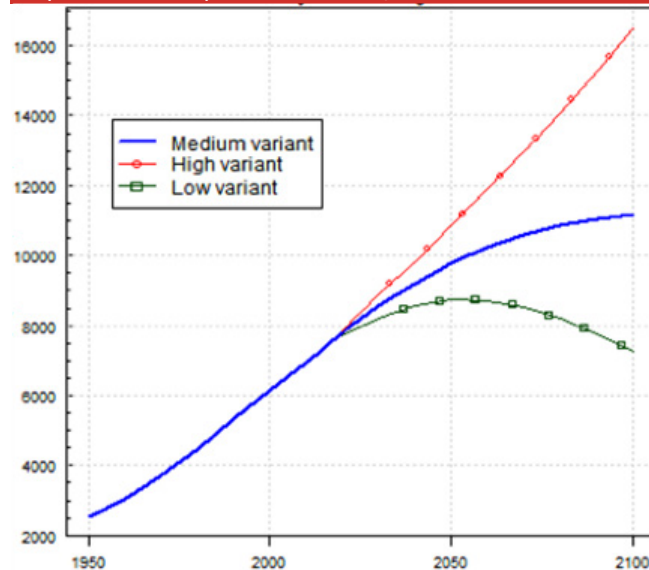
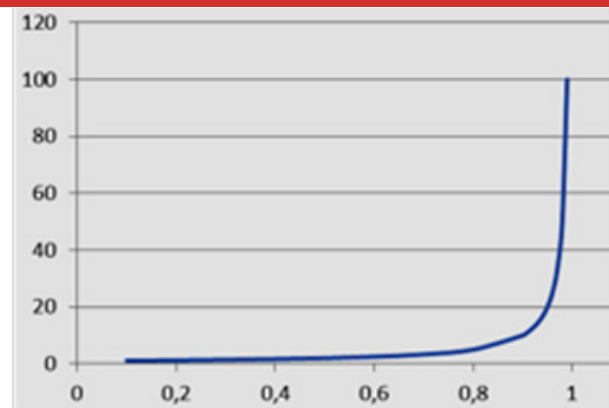


Figura 4-5

Representación gráfica de la ecuación (68) usando $x_0 = 1$, $k'' = 1$ y $t_0 = 0$



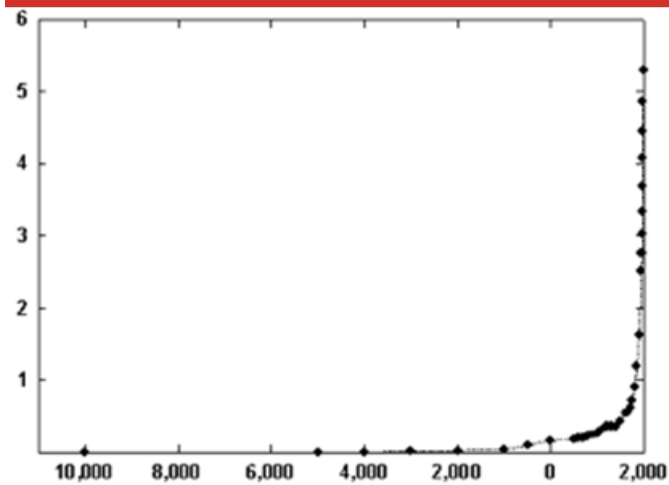
La Figura 4-7 muestra la evolución de la población humana en los últimos 10.000 años. El parecido con la Figura 4-6 no es casual; refleja el comportamiento histórico de la tasa de crecimiento mostrado en la Figura 4-1.

Como la tasa de crecimiento está ahora declinando, es obvio que la descripción de las últimas etapas de la evolución de la población requiere introducir condiciones que frenan el crecimiento. La ecuación logística presentada en el Capítulo 3 es más adecuada para describir matemáticamente la evolución de la población humana, no sólo la evolución histórica de la tasa de nacimientos (Figura 4-1), sino también la evolución más reciente (Figura 4-2). Sin embargo, la posibilidad de decrecimiento poblacional requiere descripciones más elaboradas. El tema de los modelos de crecimiento poblacional es actualmente muy sofisticado y excede los alcances de este libro. Una fuente de información muy completa es la provista por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas, en su documento *World Population Prospect: The 2012 Revision*, que se puede encontrar en http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm.

La Figura 4-5 mostró tres extrapolaciones posibles hasta el año 2100, que ilustran la posibilidad de una saturación en el crecimiento, o incluso de una declinación. La extrapolación en azul corresponde a la ecuación logística. En cambio, la extrapolación en verde requiere que la tasa de crecimiento poblacional, dx/dt , sea negativa a partir de 2050.

Figura 4-6

Evolución de la población humana global, en miles de millones de personas desde el año 10.000 antes de Cristo. Fuente: C. Marchetti, P.S. Meyer y J.S. Ausubel, Human Population Dynamics Revisited with the Logistic Model: How Much Can Be Modeled and Predicted? Technological Forecasting and Social Change 52, 1-30 (1996). Ver:



4.2. La revolución industrial

Esta sección está tomada, con algunos cambios, de Blesa (2010)

Las postrimerías del Siglo XVIII marcan un cambio drástico en la forma de interacción del hombre con su entorno. Eric Hobsbawm llama La Era de la Revolución al período que va desde 1789 hasta 1848, en referencia a "la doble revolución", la Revolución Francesa de 1789 y la Revolución Industrial, cuyo comienzo ubica en Inglaterra en la década de 1780 a 1790. Dice Hobsbawm (1991):

...un día entre 1780 y 1790, y por primera vez en la historia humana, se liberó de sus cadenas al poder productivo de las sociedades humanas, que desde entonces se hicieron capaces de una constante,

rápida y hasta el presente, ilimitada multiplicación de hombres, bienes y servicios.... Y tanto Inglaterra como el mundo sabían que la revolución industrial iniciada en aquellas islas por y a través de los comerciantes y empresarios cuya única ley era comprar en el mercado más barato y vender sin restricción en el más caro, estaba transformando el mundo. Nadie podía detenerla en su camino. Los dioses y los reyes del pasado estaban inermes ante los hombres de negocios y las máquinas de vapor del presente.

Las trabas impuestas por la naturaleza parecía que podían ser derrotadas; la ciencia y la tecnología basada en la ciencia fueron acompañando a la revolución industrial, y el hombre creyó que podía erigirse en el dueño del mundo, que su poder para domeñar la naturaleza estaba sólo limitado por su ingenio.

La palabra "ingeniero" adquirió su significación actual durante la revolución industrial. Y los ingenieros fueron el símbolo de esa relación con la naturaleza. En 1894 Julio Verne publica La isla Misteriosa (ver Figura 4-8), cuyo héroe es el ingeniero Cyrus Smith (norteamericano, seguramente no era una casualidad). La primera parte es la saga de la dominación de la isla de Lincoln, del desarrollo de la alfarería, la metalurgia y, en fin, la industria química pesada (itodo realizado por cinco hombres!) en lo que bien puede ser una alegoría de la dominación del mundo por el homo sapiens. Esta parte refleja claramente la dialéctica establecida con la naturaleza por el hombre hasta por lo menos la segunda mitad del siglo XX. Es interesante que la cuarta parte del libro de Verne sin embargo ya describe los límites de esa soberbia: una erupción volcánica destruye la isla.

La magnitud de la intervención humana fue aumentando a lo largo del siglo XIX, y muy especialmente durante el siglo XX. A mediados de ese siglo comienzan a surgir voces de alarma sobre la posibilidad de que, como consecuencia directa de los actos del hombre, se pueda producir el Fin del Mundo, o por lo menos el fin de la civilización. Al principio, el tema central era la guerra fría, en un marco en el que las armas de destrucción

masiva habían alcanzado dimensiones inimaginables. En 1962, Rachel Carson publicaba Silent Spring (ver Figura 4-9), donde llamaba la atención sobre los efectos del uso indiscriminado de insecticidas: ya aparece el Holocausto Ambiental en toda su dimensión, y aparece el acalorado clima de discusión, con argumentos no siempre racionales y casi nunca desapasionados.

Figura 4-7

(a) Portada de L'Ile Mysterieuse. Tomada de ; (b) Retrato de Julio Verne. Tomado de ; (c) Mapa de la isla de Lincoln. Tomada de La colección de Gamt de Vries,

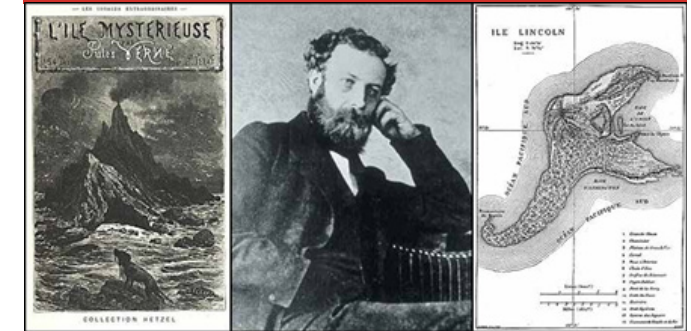


Figura 4-8

Fotografía de Rachel Carson (1907- 1964) y portada de su libro Silent Spring, que se transformó en best seller. Tomado de



Sólo siete años después, el biólogo Paul Ehrlich (ver Figura 4-10) presentó una visión apocalíptica de las

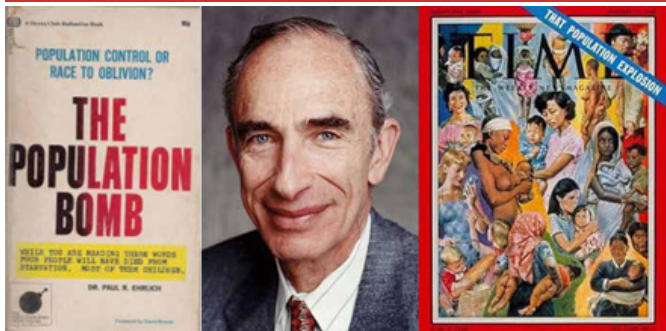
consecuencias del crecimiento de la población mundial en The Population Bomb¹⁰.

*...The battle to feed all of humanity is over...
Population control is the only answer...*

(La batalla para alimentar toda la humanidad ha concluido... La única respuesta es el control poblacional...)

Figura 4-9

(a) Tapa del libro The Population Bomb; (b) Paul Ehrlich (tomado de) (c) tapa de la revista Times del 11 de enero de 1960 (tomado de)



En ese libro, Ehrlich plantea tres posibles escenarios para el futuro de la humanidad:

Escenario I: En 1972, como consecuencia de hambrunas generalizadas en China, se deteriora la situación en el sudeste asiático; la consecuencia final es la guerra nuclear, con 100 millones de norteamericanos muertos en la costa oeste en 1973 (no menciona las bajas en Asia).

Escenario II: Un dantesco escenario que comienza en 1979 y que culmina con la siguiente oración:

10. En realidad, el tema de la explosión poblacional había sido difundido con anterioridad por Fairfield Osborn en Our Plundered Planet y por William Vogt en Road to Survival ambos de 1948. Tanto es así, que ya en 1960 la revista Times escogía como tema de tapa The Population Bomb.

The most intelligent creatures ultimately surviving this period are cockroaches.

(Las criaturas más inteligentes que sobrevivieron finalmente a este período son las cucarachas)

Escenario III: A partir de 1974 se rompe la estructura política de la mayor parte de lo que se llamaba el tercer Mundo. En 1985, cuando ha concluido la mortandad mayor, los países centrales inician un programa de rehabilitación por áreas y programan una población global para 2025 de dos mil millones de personas. Éste es el escenario optimista.

No era intención de Ehrlich asignar realidad a la concreción exacta de alguno de estos tres escenarios. No debe creerse pues que el hecho que no se hayan cumplido estas predicciones nos permita descartar la inminencia de grandes desastres originados por la sobrepoblación en las condiciones actuales de consumo de energía y de recursos naturales. El mismo Paul Ehrlich escribió en 1990, con Anne Ehrlich, The Population Explosion, una revisión de su libro anterior. En el libro discuten la interrelación entre la epidemia de SIDA, el calentamiento global, la destrucción del ozono estratosférico, la lluvia ácida, la deforestación, los incendios de bosques, la producción de alimentos, atascos de tránsito, tráfico de drogas y otros delitos, para vincular todos estos temas con la explosión demográfica.

Allí se concluye que el fin de civilización que conocemos sigue siendo altamente probable, aunque la terminación no sea una explosión, sino un gemido (whimper), tomando la imagen de las últimas estrofas del poema The Hollow Men, de T.S. Eliot¹¹

El Gemido es, simplemente, el modo como terminará la civilización si continúa la tendencia actual población/recursos/medio ambiente. Supondría el

11. T.S. Eliot (1888-1965), laureado con el premio Nobel de Literatura en 1948, escribió The Hollow Men en 1925. Las últimas estrofas dicen: *This is the way the world ends, This is the way the world ends, This is the way the world ends, Not with a bang but a whimper.*

advenimiento de un mundo semejante al que dejarían tras de sí la guerra y el invierno nucleares, aunque más lentamente, en una escala de tiempo de años y no de semanas.

¿Cuál es la visión de Paul Ehrlich en 2015? La respuesta se puede encontrar en un interesante vídeo del New York Times (en inglés): The unrealized horrors of population explosion, RetroReport por Clyde Haberman, . Allí se puede escuchar a Ehrlich diciendo:

My language would be even more apocalyptic today.

(Hoy, mi lenguaje sería aún más apocalíptico).

Y agrega, referido a la costumbre de permitir a las mujeres tener tantos hijos como quieran:

[it is equivalent to allowing them to] throw as much of their garbage into their neighbor's backyard as they want.

[esto es equivalente a permitirles] arrojar toda la basura que quieran en el jardín del vecino.

Pero el mismo informe describe la situación actual como una en que más que temer el "baby boom" (explosión de nacimientos), hay que temer el "baby bust" (liquidación de los nacimientos), lo que lleva a sociedades envejecidas.

En definitiva, como discutimos más arriba (ver por ejemplo Cuadro 1), la dinámica de crecimiento de la población no responde a leyes matemáticas tan sencillas como ocurre con otras especies y la tasa de nacimientos parece estar estabilizándose. ¿Por qué entonces mantener un lenguaje apocalíptico? En primer lugar porque Ehrlich cambia el foco, que ya no es la crisis alimentaria sino el impacto ambiental, y en segundo lugar porque ese lenguaje está pensado no como parte de un debate científico, sino como una herramienta de acción política. Por eso es que en base a las ideas de Ehrlich se construyó el movimiento Zero Population Growth

Tal vez la mayor crítica que puede hacerse a la visión de Ehrlich es precisamente político-ideológica: la misma es esencialmente una mirada desde los países centrales y parece una búsqueda de statu quo con una clara diferenciación entre las condiciones de vida en países centrales y periféricos. Sus implicancias ideológicas están claras, a punto tal que las visiones de Carson y de Ehrlich proveen basamento para un análisis económico, Límites al Crecimiento preparado por el grupo liderado por Dennis L. Meadows del Massachusetts Institute of Technology (MIT) a pedido del Club de Roma. (Meadows y col. 1972). Este análisis se discute más adelante (Cuadro 4.2).

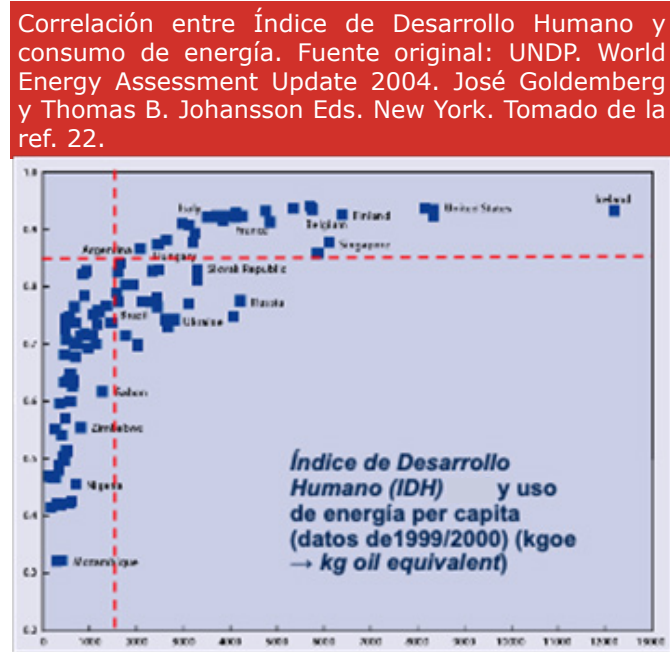
La década de 1990 fue marcada a fuego por la globalización de la economía. Hobsbawm describe al Siglo XX como un siglo corto, que comienza en 1914, con la Primera Guerra Mundial, y termina en 1991, con la caída de la Unión Soviética. La nueva era es la era global, y la mirada sobre la ecología y el ambiente se ve fuertemente influida por la globalización. Estamos pues tal vez ante la pregunta más crucial: ¿es el modelo socio-económico imperante en la actualidad capaz de incorporar las limitaciones que impone el ambiente? No tenemos experiencia sobre cómo se puede lograr una desaceleración del impacto ambiental, sin desacelerar la necesidad imperiosa de crecimiento de los países más postergados. La Figura 4-11 muestra un gráfico que correlaciona el Índice de Desarrollo Humano con el consumo de energía *per capita* en los diversos países¹². Si ese índice refleja algún tipo de realidad, sugiere Blanco Gálvez, tal vez deberíamos conformarnos con alcanzar una calidad de vida como la que caracteriza a la Argentina. En efecto, la Figura 7 muestra la relación entre el Índice de Desarrollo Humano (que es una medida posible de la calidad de vida) y el consumo energético. Puede verse que mejoras en el índice, a partir de la situación argentina puede lograrse solo a costa de fuertes incrementos en el consumo energético, que es una buena medida del impacto del hombre sobre el ambiente¹³.

12. Julián Blanco Gálvez, V Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental, Mar del Plata (2008).

13. Una colega nos hizo notar que el caso de Islandia es muy especial, ya que ese país deriva el grueso de su energía de la actividad geotérmica, cuyo impacto ambiental es mucho menor.

¿Estamos dispuestos a aceptar esa conclusión?

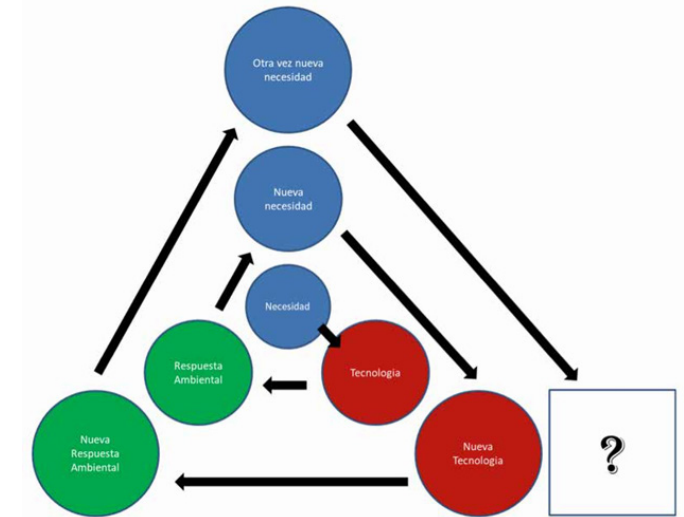
Figura 4-10



Los grandes problemas ambientales no desembocan necesariamente en grandes catástrofes. Existen también respuestas ambientales más suaves, pero aun importantes, a la actividad humana. La historia de la humanidad está llena de ejemplos de desarrollos del hombre para adecuar el ambiente a sus necesidades; hoy los llamamos desarrollos tecnológicos. Sin embargo, ha sido sólo muy recientemente que hemos aprendido que todos estos desarrollos generan una respuesta ambiental, que puede poner en crisis las capacidades de sostener las nuevas tecnologías en el tiempo. Los cambios ambientales producidos por el hombre resultan de una combinación de factores tecnológicos, económicos, sociales y culturales que impactan sobre el medio físico y biológico, medio que a su vez genera respuestas muchas veces inesperadas. Se genera así una espiral de necesidades, desarrollo de tecnologías y respuestas ambientales, como se ilustra en la Figura 4-12.

Figura 4-11

Desarrollo de tecnologías y la respuesta ambiental.



La Tabla 4-1 muestra la interpretación de las distintas etapas de la Figura 4-12 para el caso del control de enfermedades transmitidas por mosquitos.

Tal vez ahora no estemos convencidos que podemos domeñar la naturaleza sin restricciones, pero sigue vigente la idea de que podemos enfrentar exitosamente las respuestas ambientales a nuestras intervenciones. Hasta ahora, hemos aprendido por experiencia cuáles son las respuestas ambientales, viendo lo que ocurría una vez implementadas las nuevas tecnologías. Nuestra capacidad de predicción ha sido baja. Tal vez las preguntas más importantes que necesitamos contestar se refieren a nuestra capacidad real de remediar los daños ya causados, y a nuestra capacidad a futuro de poder prever la respuesta ambiental a una innovación antes de implementarla (evaluación de riesgo ambiental; evaluación ambiental estratégica).

Tabla 4-1. Historia ambiental del DDT

Etapa	Descripción
Necesidad	Combatir la malaria y disponer de insecticidas poderosos
Tecnología	La empresa Geigy desarrolla el DDT. En 1948, se otorga el premio Nobel de Medicina a Paul Müller
Respuesta ambiental	Ecotoxicidad del DDT. Rachel Carson publica Silent Spring en 1962. Comienza a aparecer resistencia de los mosquitos al DDT
Nueva necesidad	Se prohíbe el DDT en agricultura, se necesitan nuevos insecticidas.
Nueva tecnología	Se desarrollan nuevos insecticidas más amigables.
Nueva respuesta ambiental	Resurgimiento de la malaria, el dengue, etc.
Otra vez, nueva necesidad	Combatir y prevenir la diseminación de enfermedades transmitidas por mosquitos
Otra vez, nueva tecnología	Técnica del insecto estéril (https://www.iaea.org/es/temas/tecnica-de-los-insectos-esteriles)

Detrás de ambas está por supuesto la pregunta más central: ¿Podemos seguir creciendo indefinidamente, y al mismo tiempo de forma sostenible? O, a la inversa: ¿Es socialmente viable una desaceleración del crecimiento, para protegernos, protegiendo nuestra circunstancia, sin fuertes perturbaciones sociales? Nuestro recorrido de la historia debería haber puesto en claro que la respuesta a los problemas ambientales no provendrá sólo de las Ciencias Exactas y Naturales;

los aspectos sociales son fundamentales. Pero, a la inversa, los límites impuestos por nuestro ambiente deben ser descritos originalmente por dichas ciencias, para después tener en cuenta las características sociales, políticas y económicas.

4.3. El Desarrollo Sostenible¹⁴

El informe "Nuestro Futuro Común" de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1987 definió desarrollo sostenible:

*"la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades"*¹⁵.

Se busca así resolver la tensión entre la necesidad de desarrollo, visualizado como imprescindible para ir mejorando el bienestar general, y de sustentabilidad, para mantener en el tiempo las condiciones adecuadas para dicho desarrollo.

El concepto de desarrollo sustentable es ampliamente aceptado y ha sido adoptado como un objetivo deseable por muchas instituciones, gobiernos, empresas, organizaciones no gubernamentales y las mismas Naciones Unidas. Hoy no quedan dudas de que el desarrollo sustentable integra tres dimensiones indisolubles: la protección del ambiente, el desarrollo social y el desarrollo económico. Dimensiones que, como resultado de la complejidad de la que forman parte, no reconocen límites disciplinares, sectoriales, institucionales ni geográficos.

Las tres dimensiones no se compatibilizan fácilmente. El crecimiento económico, base del desarrollo, se basa

14. Tomamos los términos sostenible y sustentable como equivalentes. No son equivalentes los términos desarrollo sustentable y sostenible en español. El primero refiere al medio natural. El segundo incorpora al medio socioeconómico y cultural.

15. Organización de las Naciones Unidas (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. "Nuestro futuro común". Para más información ver: <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues>

usualmente en el consumo irrestricto de recursos naturales y entra en colisión con la protección ambiental, por sus impactos ambientales a escala local, regional y global. El crecimiento económico, usualmente medido a través del producto bruto interno (PBI) también entra frecuentemente en colisión con el desarrollo social. En los momentos que se escriben estas líneas (2018), la desigualdad intra- e inter- nacional (medida por ejemplo por el índice de Gini) está creciendo en el mundo. En la Argentina, la pobreza está alcanzando niveles extremadamente altos.

La Organización de las Naciones Unidas ha adoptado el Desarrollo Sustentable como su bandera, y ha establecido en 2015 los diecisiete Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). Los ODS que se proponen alcanzar en el período 2015-2030 son los siguientes¹⁶.

Figura 4-12

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU. Fuente:



Los ODS entraron en vigor oficialmente el 1º de enero de 2016. La Argentina también los adoptó. Desde el punto de vista de la Gestión Ambiental, el gran desafío reside en resolver la tensión existente entre el cuidado del ambiente y el desarrollo económico. Usualmente, este segundo aspecto prevalece rotundamente en cualquier situación de incompatibilidad.

16. Organización de las Naciones Unidas (2015). Objetivos de Desarrollo Sustentable. Para más información ver: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Cuadro 4-1

Límites al crecimiento y el Modelo Mundial Latinoamericano

Las ideas maltusianas de crecimiento exponencial de la población y crecimiento más lento de los recursos tomaron la forma de un modelo computacional desarrollado por el grupo liderado por D. Meadows del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) a pedido del Club de Roma. (Meadows y col. 1972).

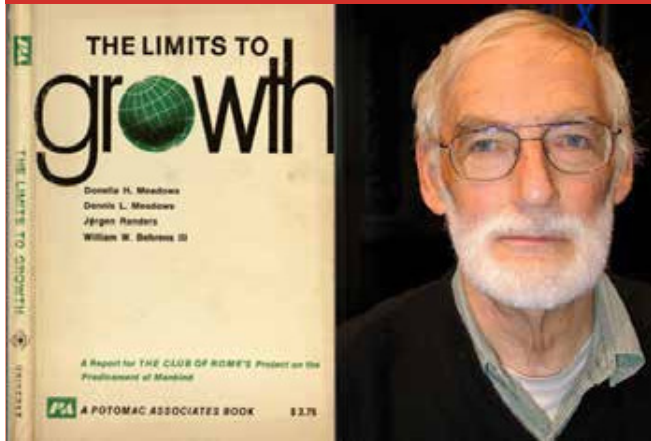
Este modelo analizaba la posible evolución futura (a partir de 1970) de la población, de la producción de alimentos, de la industrialización, de la contaminación y del agotamiento de recursos naturales no renovables.

Las ecuaciones matemáticas usadas para describir la evolución temporal de estos factores fueron esencialmente la función exponencial simple, y la forma de la ecuación logística (3.63), que pone un límite al crecimiento exponencial cuando el crecimiento se aproxima a la capacidad máxima del ambiente de sostener la vida (K en la ecuación 3.63). Los límites que definen dicha capacidad máxima son precisamente la capacidad de producción de alimentos, la capacidad industrial, la capacidad de soportar contaminación y la capacidad de la naturaleza para proveer recursos naturales. Cuando cualquiera de estas variables supera dicha capacidad se produce un derrumbe en la población.

Los autores señalan como sus conclusiones las tres siguientes (traducción propia):

1. Si continúan sin cambios las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial, industrialización, contaminación, producción de alimentos y agotamiento de recursos, los límites del crecimiento en este planeta se alcanzarán en algún momento dentro de los próximos cien años. El resultado más probable será una declinación más bien abrupta e incontrolable tanto en población como en capacidad industrial.

Figura 4-13. Carátula del libro *The Limits to Growth* y foto de Dennis L. Meadows



2. Es posible alterar estas tendencias de crecimiento y establecer una condición de estabilidad ecológica y económica que es sostenible en el futuro lejano. Se podría diseñar el estado de equilibrio global como para satisfacer las necesidades materiales básicas de cada persona en la tierra y como para que cada persona tenga la misma oportunidad para alcanzar su potencial humano individual.

3. Si la gente del mundo decide apuntar a este segundo resultado más que al primero, cuanto antes comiencen a trabajar para alcanzarlo mayores serán sus chances de éxito.

En Latinoamérica surgió pronto un cuestionamiento conceptual profundo al modelo de Meadows, que desembocó en el llamado Modelo Mundial Latinoamericano, confeccionado por un grupo importante de intelectuales, nucleados alrededor de la Fundación Bariloche y coordinados por Amílcar Herrera.

El resultado fue el libro *¿Catástrofe o Nueva Sociedad?*

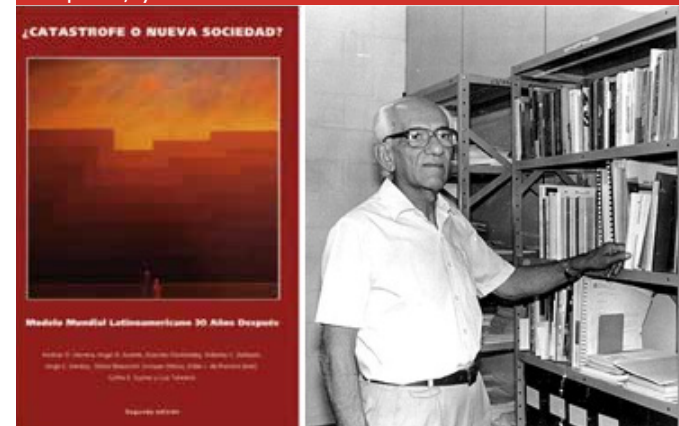
La versión revisada *¿Catástrofe o Nueva Sociedad? 30 Años después* puede encontrarse en

Allí dice Enrique Oteiza:

...la propuesta supuestamente superadora presentada por Meadows consistía en que en los países centrales se mantuviera un crecimiento económico cero, y en la periferia un control y reducción de la población. La lógica neo-malthusiana del modelo lograba con esta respuesta evitar la catástrofe.

El camino alternativo que siguió el grupo de la Fundación Bariloche consistió en cuestionar la tesis del agotamiento de los recursos naturales como inevitable en el marco de una dinámica social global que tuviera como meta el desarrollo, no entendido simplemente como crecimiento económico en un contexto consumista, sino en una variante orientada a la erradicación de la pobreza de la faz de la tierra.

Figura 4-14. Carátula del libro *¿Catástrofe o Nueva Sociedad? Modelo Mundial Latinoamericano 30 Años después*, y foto de Amílcar Herrera.



El Modelo Mundial Latinoamericano cambiaba entonces fundamentalmente las premisas sobre las cuales se construía el modelo. Se preguntaba

cuáles eran precisamente las premisas que se debían establecer y postulaba que se debe analizar qué modelo puede conducir a satisfacer las necesidades básicas de la población mundial. Oteiza cita a Ian Miles:

"El enfoque centrado en la satisfacción de las necesidades básicas recibió su ímpetu inicial en el trabajo del grupo de Bariloche; en su tarea de construcción de un modelo global alternativo se propusieron investigar las condiciones bajo las cuales un conjunto de necesidades básicas podrían ser satisfechas para toda la población mundial. A diferencia de otros modelos globales computarizados el de Bariloche no se orientó a la predicción de las consecuencias de las tendencias actuales, sino a demostrar la viabilidad material de un futuro deseable... La demostración de la posibilidad de satisfacer necesidades básicas en un marco de restricciones en lo que concierne al medio ambiente constituyó una importante crítica a la predicción tipo fin del mundo del modelo 'los límites del crecimiento'. También mostró la utilidad de la noción de 'necesidades básicas' como una manera de evaluar estrategias de desarrollo de largo plazo".

Algunos aspectos a destacar del modelo incluyen el uso de la esperanza de vida al nacer como la variable a optimizar y el establecimiento de un vínculo negativo entre la tasa de natalidad y el aumento del bienestar para la construcción del submodelo de población.

Este modelo es sin duda un antecedente importante de los enfoques que desembocaron en el establecimiento de los Objetivos del Desarrollo Sustentable de Naciones Unidas para 2030.

4.4. El Antropoceno

4.4.1. Generalidades

Según la descripción geológica estándar, desde hace 11.700 años estamos en la época geológica denominada *Holoceno*, que comenzó al finalizar la

última glaciación. Las épocas se definen sobre la base de los registros estratigráficos, muchas veces asociados a la evolución de la biota. Los geólogos definen el comienzo de una época o era en base a una sección estratotipo y punto de límite global, GSSP (*Global Boundary Stratotype Section and Point*), un marcador de cambios importantes en los registros estratigráficos. Es así que el GSSP que marca el comienzo del Holoceno es un incremento abrupto del contenido del isótopo ^2H (deuterio) a 1492,25 metros de profundidad en los hielos de Groenlandia. Esta profundidad corresponde a una fecha precisa: 11650±99 años antes de 1950 (esta última fecha se toma por convención como "el presente"). Ese marcador señala el comienzo de un calentamiento climático y de una estabilización del contenido de CO_2 atmosférico, tal como se muestra en la Figura 4-16 (a) (Lewis y Maslin 2015).

La pregunta que analizaremos en esta sección es si estamos entrando en una nueva época geológica.

La apertura en 2012 de Río+20, la reunión cumbre de las Naciones Unidas, incluyó la proyección del video Welcome to the Anthropocene. El mismo, que puede verse en <http://vimeo.com/39048998>, refleja la visión de que la actividad del hombre ha hecho entrar al planeta en una nueva época o edad¹⁷ geológica. Esta visión fue popularizada originalmente por el meteorólogo holandés Paul J. Crutzen, el mismo que fuera galardonado con el Premio Nobel (ver Figura 6-21) por su identificación del problema del adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico (Zalasiewicz y col. 2010). No es una visión aceptada oficialmente por la Geología, pero sirve para ilustrar los drásticos cambios que está sufriendo el planeta. La influencia del hombre sobre el planeta comenzó a manifestarse de manera importante con la agricultura, se aceleró mucho con la revolución industrial, y sufrió después la llamada Gran Aceleración, a partir de mediados del siglo XX.

La Figura 4-16 muestra en (b), (c) y (d), tres opciones de inicio del Antropoceno propuestas por Lewis y Manlin (2015). La primera opción (b) elige como marcador el mínimo en los niveles de metano atmosférico, 5020

años antes de 1950. Esa opción implica señalar que el comienzo de la agricultura y otras actividades humanas marca el comienzo de la nueva época. Los propios autores descartan esa elección, para centrarse en las otras dos: en (c), se elige la fecha del año 1610, en el mínimo de los niveles atmosféricos de dióxido de carbono. Es interesante aunque discutible la interpretación de esa fecha: la caída previa en los niveles de CO_2 . Se asocia esa caída con la recuperación de forestas en América, provocada por la disminución de la actividad humana, causada a su vez por el genocidio de los pueblos originarios víctimas de los conquistadores europeos a partir de 1582, que se estima cobró 40 millones de víctimas mortales. La otra opción (d) usa como marcador el máximo en la concentración atmosférica de ^{14}C en el año 1964. El aumento de ^{14}C , que alcanzó su máximo en 1964 se debió a las explosiones atómicas comenzadas en 1945. La elección de esos marcadores no es inocente: a partir de una metodología aceptada por las Ciencias Naturales, busca fijar fechas que tengan un impacto en la percepción social de los problemas ambientales.

Más allá de la validez o no del concepto geológico, es obvio que el hombre ha cambiado apreciablemente las características del planeta, generando cambios de profundo impacto ambiental: el adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico, el cambio climático, la deforestación, la pérdida de biodiversidad, los cambios cuantitativos y cualitativos en la población humana (concentración en ciudades, aumento de la expectativa de vida).

17. Las edades son subdivisiones de las épocas.

Figura 4-15

(a) Ubicación del GSSP para el comienzo del Holoceno; (b), (c), (d) tres posibles GSSPs para marcar el comienzo del Antropoceno, como se discute en el texto (reproducida de Lewis y Maslin 2015).

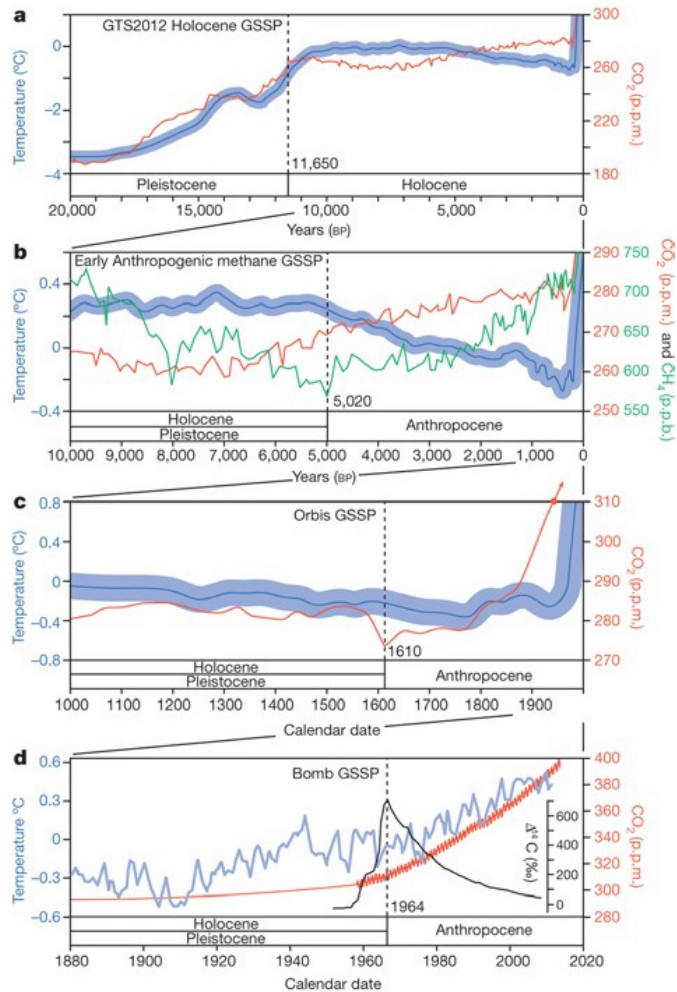
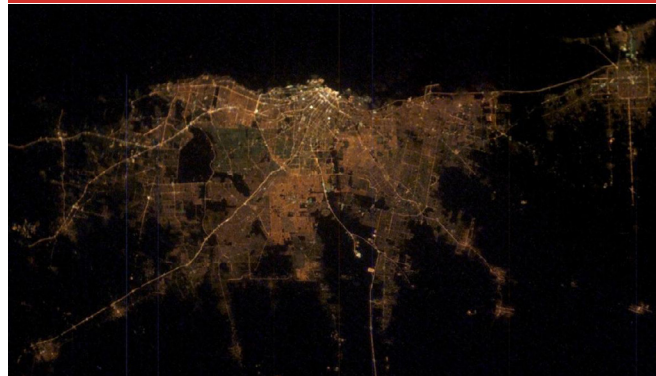


Figura 4-16.

Imagen satelital del Gran Buenos Aires en 2003. Fuente:



Cuadro 4-2

Metabolismo urbano

El crecimiento de las grandes urbes es un fenómeno que está ocurriendo en gran escala y la sustentabilidad de esas ciudades es un tema de análisis y preocupación. Uno de los métodos de análisis es el del *Metabolismo Urbano* que asemeja a la ciudad a un organismo que requiere de insumos materiales y de energía y que libera grandes cantidades de residuos. Se ha definido el metabolismo urbano como *el conjunto de todos los procesos técnicos y socioeconómicos que tienen lugar en las ciudades y que conducen al crecimiento, producción de energía y eliminación de residuos* (Kennedy, C.A., J. Cuddihy y J. Engel Yan. The changing metabolism of cities, Journal of Industrial Ecology. Mayo 2007.

La Figura 4-18 muestra esquemáticamente el metabolismo urbano. A la derecha, la misma indica los indicadores que se pueden usar para cuantificar el impacto ambiental del metabolismo urbano (adaptada de Goldstein B., Birkved M., Quitzau M.-B., Hauschild M., 2013. *Quantification of urban metabolism through coupling with the life cycle assessment framework: concept development and case study*. Environmental Research Letters 8.

El destino metabólico de los insumos debe analizarse en detalle, y el punto que aquí queremos enfatizar es la necesidad que tiene este tipo de análisis de un buen manejo operativo de las propiedades de los materiales y de la energía.

Figura 4-17.

Metabolismo Urbano.

- Alimentos.
- Agua.
- Combustibles para el transporte y generación de electricidad.
- Materiales diversos (madera, cemento, papel, vidrio, plásticos, metales).
- Artefactos electrodomésticos, electrónicos, etc.



- Contaminación atmosférica.
- Residuos sólidos.
- Contaminación del agua.
- Ocupación del territorio.
- Etc.

En el Antropoceno, el hombre parece capaz de interferir con los delicados mecanismos fisicoquímicos que controlan el funcionamiento de nuestro ambiente. En este libro nos centraremos en estos efectos de la actividad humana sobre el ambiente; para el análisis de las características y consecuencias de la pérdida de biodiversidad, debe consultarse la bibliografía. Hablaremos pues muy brevemente de la capa de ozono y de la degradación de los suelos por erosión y otros fenómenos, para centrarnos en la descripción del cambio climático.

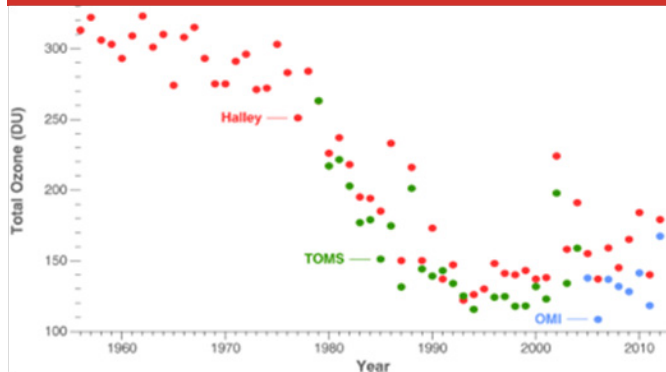
4.4.2. El adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico

En el Capítulo 1 describimos el origen químico de la destrucción parcial del ozono estratosférico, y de las posibles consecuencias sobre la vida en la superficie de la Tierra. Queremos ahora describir algunos aspectos técnicos importantes del fenómeno atmosférico.

La disminución del ozono estratosférico ocurrió esencialmente en la década de 1980, como puede apreciarse en la Figura 4-19. Las primeras mediciones son de 1956, y el año siguiente, en el marco de las actividades del Año Geofísico Internacional, se implementó un programa de mediciones.

Figura 4-18.

Los niveles de ozono estratosférico, en unidades Dobson, desde 1956 hasta 2012. Los puntos en rojo son mediciones realizadas a baja altitud en el Observatorio Halley, establecido por Gran Bretaña en la Antártida. Los puntos en verde son mediciones satelitales en la estratosfera, realizadas con el espectrómetro de Monitoreo Total de Ozono (TOMS, por su sigla en inglés)

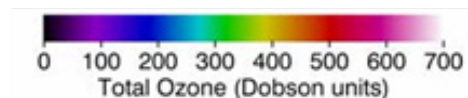
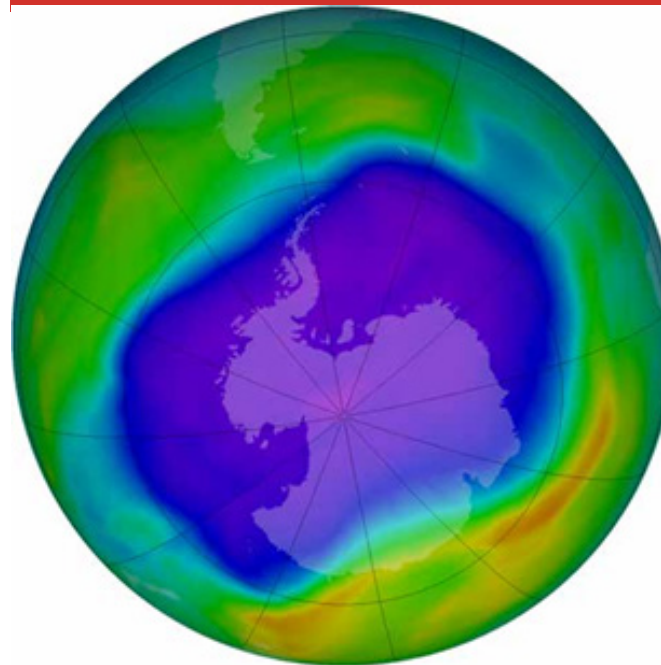


En la década de 1990 la capa se estabilizó, y las mediciones durante el siglo XXI sugieren un cierto grado de recuperación, pero con mucha dispersión. La Figura 4-20 muestra una imagen tomada en el momento de máxima degradación de la capa de ozono, el 24 de septiembre de 2006.

La concentración de ozono en la atmósfera se mide en las llamadas *unidades Dobson*, DU. Si nos imaginamos que armamos una columna de ozono puro en la atmósfera a 1 atmósfera de presión, ¿qué altura tendría esa columna? 1DU equivale a una columna de 10 micrometros de altura, de forma que un valor típico, como 300 DU corresponderían a una columna de 3 mm de altura. Las mediciones se realizan actualmente desde satélites, usando espectrómetros que miden la radiación que absorbe o que emite el ozono.

Figura 4-19.

La disminución de la capa de ozono sobre Antártida el 24 de septiembre de 2006. La imagen usa un método convencional de representación, en la que los colores representan distintos niveles de ozono, según muestra la escala.



La identificación del problema del ozono también marcó fuertemente la necesidad de enfoques interdisciplinarios. En la dilucidación de aspectos físicos, químicos y meteorológicos participaron meteorólogos, químicos y biólogos. El Premio Nobel de Química de 1995 fue otorgado a los químicos Mario Molina y F. Sherwood Rowland y al meteorólogo holandés, Paul J. Crutzen¹⁸, quienes explicaron las bases químicas y

18. Crutzen fue quien popularizó el término Antropoceno.

desarrollaron los modelos atmosféricos necesarios para comprender la química de la estratosfera y explicar el fenómeno que ocurre esencialmente en el hemisferio austral (Figura 4-21).

La gestión del problema requirió una respuesta internacional, que tomó forma en el llamado Protocolo de Montreal, en 1987. Los CFC han sido actualmente remplazados por otros gases menos estables, que no atraviesan sin destruirse la troposfera.

Figura 4-20.

Extremos: Carátulas del primero (1985) y del séptimo informes Scientific Assessments of Ozone Depletion de la World Meteorological Organization (WMO) y del United Nations Environment Programme (UNEP). Centro: Mario J. Molina (izquierda), Paul Crutzen y F. Sherwood Rowland (derecha).



4.4.3. La naturaleza de los suelos y su degradación

Las Ciencias del Suelo estudian la superficie de la Tierra en cuanto recurso natural, soporte de la actividad agrícola-ganadera. Dentro de ellas, la Pedología estudia la génesis de los suelos y su clasificación, y la

Es interesante rescatar una anécdota personal contada por Crutzen, que muestra que no hay peor desastre ambiental que la Guerra. Dice Crutzen, recordando su infancia en Amsterdam (Holanda): (http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1995/crutzen-lecture.pdf): *The last months of the war, between the fall of 1944 and Liberation Day on May, 5, 1945, were particularly horrible. During the cold "hungerwinter" (winter of famine) of 1944-1945, there was a severe lack of food and heating fuels. Also water for drinking, cooking and washing was available only in limited quantities for a few hours per day, causing poor hygienic conditions. Many died of hunger and disease, including several of my schoolmates.*

Edafología estudia a los suelos en cuanto sustrato de organismos vivos, en especial plantas.

Los suelos están compuestos por capas superpuestas, que se llaman *horizontes*, y que difieren en composición química, granulometría y porosidad. El humus se encuentra en el horizonte A, y en él se enraízan las plantas; su límite superior está formado por restos de los vegetales. Por debajo encontramos sucesivos horizontes que van evolucionando desde materiales arcillosos hasta material rocoso.

De una manera grosera, se puede visualizar el origen del suelo como un proceso que comienza por la acción de líquenes y musgo que colonizan la roca, gestando así condiciones en las cuales se pueden establecer hierbas y arbustos, al dar lugar a la aparición del Horizonte A rico en humus. El resultado final es un suelo complejo, estable, que soporta ecosistemas también complejos. En estas condiciones la vegetación estabiliza al suelo, al proveer el humus y prevenir la erosión causada por el viento y el agua.

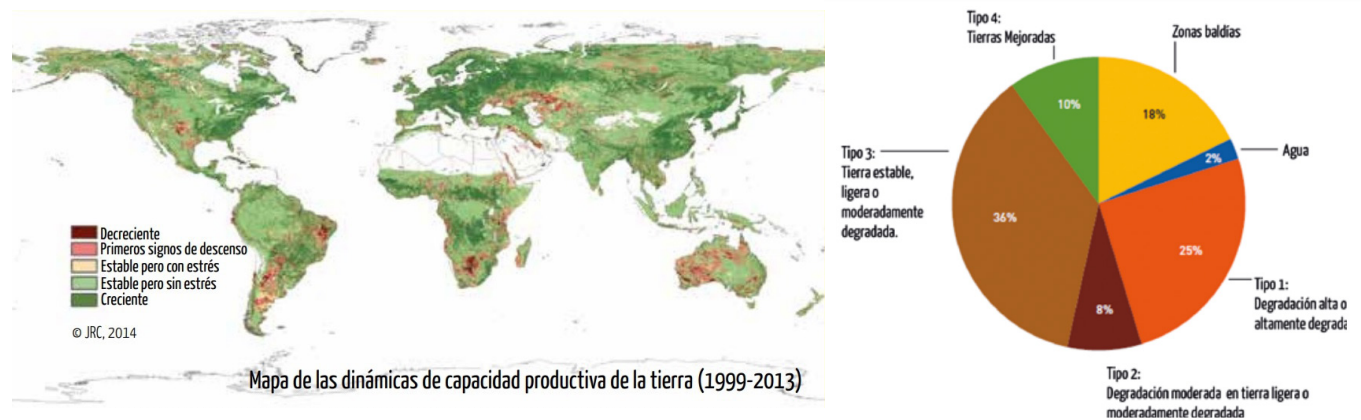
En general, la degradación del suelo está vinculada con la pérdida de capacidad de soportar la agricultura, y por lo tanto como un factor de importancia en la seguridad alimentaria. Existen muchas formas de degradación del suelo, algunas de origen natural y otras de origen antrópico.

Acidificación. Las arcillas que contienen los suelos son aluminosilicatos de diversos cationes alcalinos (sodio, potasio, calcio y magnesio). El ingreso de un ácido al suelo puede generar el remplazo de estos cationes por protones, y la eliminación de los cationes con el agua que escurre. Cuando eso ocurre, se altera la capacidad del suelo para la agricultura, y se incrementa el riesgo de erosión y de contaminación. Los ácidos pueden llegar al suelo por distintos factores: la lluvia ácida (ver Capítulo 2), el uso de fertilizantes nitrogenados ácidos, como las sales de amonio, e incluso por meteorización de rocas graníticas (ver Capítulo 1) que contienen mucha sílice y muy pocos cationes alcalinos.

Desertificación. Este fenómeno no debe confundirse con el de desertización, fenómeno natural que puede

Figura 4-21.

Cambios en la productividad de los suelos entre 2005 y 2013: Los colores más oscuros indican suelos más degradados. El círculo de la derecha muestra las tendencias globales en la degradación de los suelos. Tomada de Desertification. The invisible frontline, publicación de la Convención de Naciones Unidas para Combatir la Desertificación, ver



ser causado por diversos factores. En la historia de la Tierra existen ejemplos extremos de desertización, como la génesis del desierto de Sahara. Aquí la desertización tuvo lugar en el Holoceno (ver Capítulo 1), y estuvo vinculado a cambios geofísicos (cambios en la orientación del eje terrestre) que a su vez desencadenaron cambios climáticos (cambios en el régimen de los monzones), de forma que en los últimos 4300 años el Sahara ha sido un desierto.

La Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación de Naciones Unidas define a la desertificación como la degradación de las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultantes de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas. Mientras que la sequía es un fenómeno eminentemente natural, producto de la disminución de las precipitaciones, la desertificación tiene raíces naturales pero también está fuertemente definida por factores sociales, culturales y políticos. El resultado es la pérdida de cubierta vegetal y de fauna silvestre. Fenómenos

tales como incendios no controlados, sobrepastoreo y prácticas agrícolas incorrectas en general, y la tala indiscriminada de bosques contribuyen fuertemente al riesgo de desertificación. Los ecosistemas vulnerables representan más de un tercio de la tierra disponible en el planeta, y la presión antrópica en esos sitios puede conducir al deterioro de la capacidad de producir alimentos e incluso de disponibilidad de agua.

Contaminación. Este fenómeno, de origen antrópico, implica la incorporación al suelo de sustancias de diverso origen, que pueden producir la degradación del suelo y/o riesgos para la salud. Las sustancias incorporadas pueden ser petróleo y sus derivados, agroquímicos, metales pesados, entre otras.

4.4.4. La pérdida de biodiversidad

A lo largo del Holoceno se registraron extinciones bien documentadas, y está en discusión el concepto de una sexta extinción masiva que arranca hace unos 12.000 años y se prolonga hasta el presente. En sus inicios

las especies extinguidas fueron en general grandes mamíferos como el mamut; esto ocurrió en coincidencia con el último periodo glaciario.

Ya se mencionó en el Capítulo 2 que existe mucha preocupación sobre la tasa de extinciones de especies en la actualidad, que abarca especies de diversos reinos. No hay muchas dudas de que la acción antrópica está influyendo sobre esa tasa. A modo de ejemplo, en 2008 se señaló que un tercio de las especies de anfibios está en riesgo de extinción (Wake y Vredenburg 2008).

A lo largo de su historia, el homo sapiens, como especie muy exitosa, ejerció presión sobre otras especies a través de múltiples factores. Originariamente, el factor más importante fue la caza, pero en la actualidad los factores principales caen en tres grupos:

- La ocupación del territorio por el hombre produce desplazamientos y agresiones que llevan a la extinción de especies. Estamos hablando de la deforestación, de las grandes obras hidráulicas, etc. Esta ocupación también incluye la introducción de especies foráneas que desplazan a las nativas, y la aparición de nuevas enfermedades por introducción de patógenos o sus vectores en regiones donde antes no habitaban.
- La devastación del océano. La sobrepesca pone en riesgo muchas especies. También la contaminación y el cambio de pH afectan severamente a los ecosistemas.
- El cambio climático altera drásticamente a los ecosistemas.

La pérdida de biodiversidad es altamente selectiva. Por ejemplo, un estudio en México identificó la disminución de grandes animales y la proliferación de animales más chicos, como pequeños roedores e insectos.

4.4.5. Fenómenos climáticos intensos de origen natural

Existen fenómenos naturales cíclicos y acíclicos, que no son de origen antrópico y que pueden tener fuerte impacto sobre el clima. Las erupciones volcánicas de gran magnitud (ver Capítulo 1) son ejemplos de

fenómenos que ocurren sin periodicidad conocida. El ingreso a la atmósfera de cuerpos celestes (meteoritos, asteroides) es otro fenómeno frecuente, más común de lo que habitualmente se cree.

Cuadro 4-3

Impacto de meteoritos

La Figura 4-23 muestra los eventos registrados de ingreso en la atmósfera de objetos pequeños, que se desintegraron antes de impactar la superficie terrestre.

La frecuencia de ingreso de bólidos es una fuerte función de su tamaño. Ingresan en la atmósfera aproximadamente un asteroide por año de 4 metros de diámetro, mientras que se estima que llega un asteroide de 100 metros de diámetro cada 5000 años. La Figura 4-24 muestra el número de asteroides que llegan cada 100.000 años, en función de su tamaño. Para mejor visualización, se ha separado el gráfico en dos partes, la de la izquierda corresponde a pequeños objetos (menores 30 metros de diámetro) que desintegran en la atmósfera, y la de la derecha a grandes objetos que impactan la superficie generando un cráter.

Las consecuencias ambientales del ingreso de estos objetos dependen por supuesto de su tamaño. Los objetos muy pequeños ni siquiera se detectan, y en cambio los objetos muy grandes pueden tener consecuencias catastróficas. El ejemplo bien establecido de este último caso, es el impacto de un cuerpo de unos 10 km de diámetro en la península de Yucatán en México, hace 65 millones años. El cráter de impacto de Chicxulub ofreció evidencias del evento y permitió su datación, que coincidió con el llamado evento de extinción masiva en el límite Cretáceo-Palógeno. El impacto, se cree, causó mega-tsunamis, nubes de polvo en la atmósfera que evitaron la entrada de luz e interrumpieron la fotosíntesis, vulcanismo exacerbado y otros fenómenos que causaron la extinción masiva de muchas especies animales y vegetales, entre ellos los dinosaurios (Schulte y col. 2010).

Figura 4-22

Ingreso de bólidos a la atmósfera (donde se desintegraron), registrados entre 1994 y 2013. Los círculos amarillos son eventos diurnos, y los azules nocturnos. El tamaño del círculo es proporcional al tamaño del bólido (entre 1 y 20 m de diámetro). Tomado de.

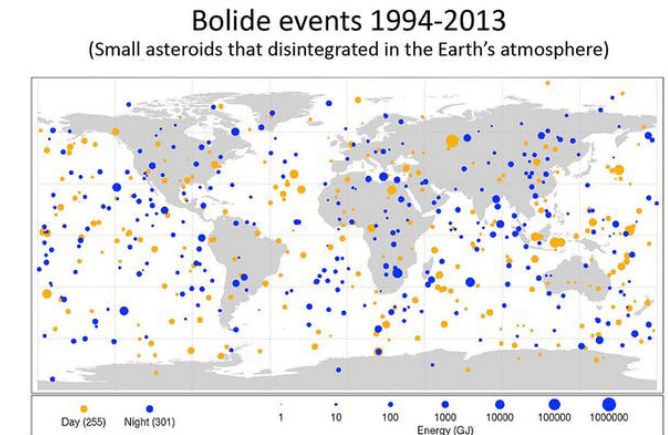


Figura 4-23

Número de ingresos de objetos cada 100.000 años, en función del diámetro, en metros.

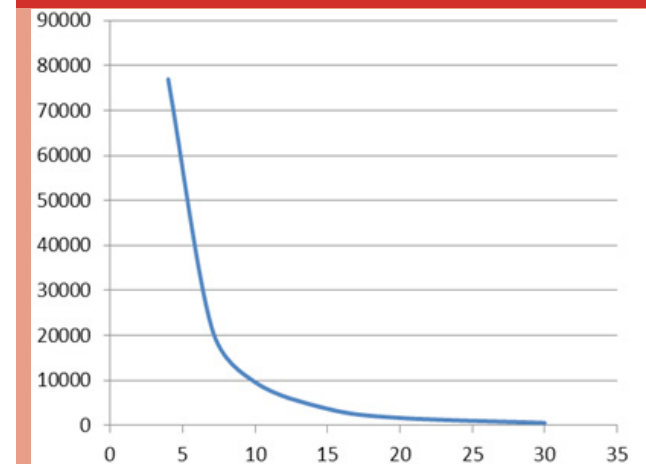
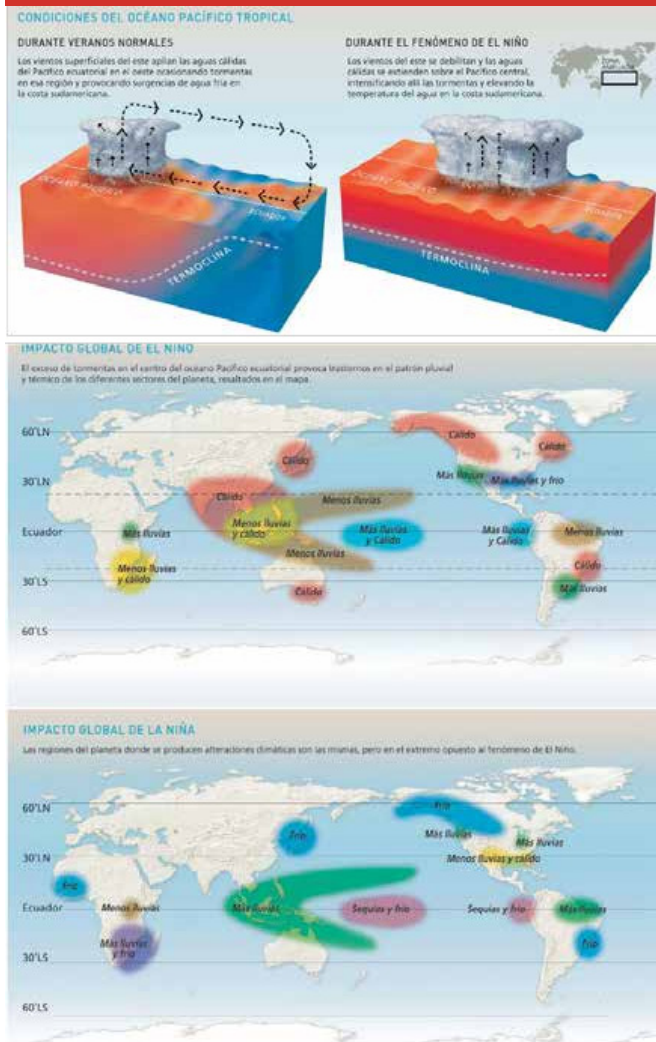


Figura 4-24.

Número de ingresos de objetos cada 100.000 años, en función del diámetro, en metros.



Entre los fenómenos cíclicos, tal vez el más importante y conocido es la Oscilación Sur del Niño (ENSO, por sus siglas en inglés), que se describe a continuación.

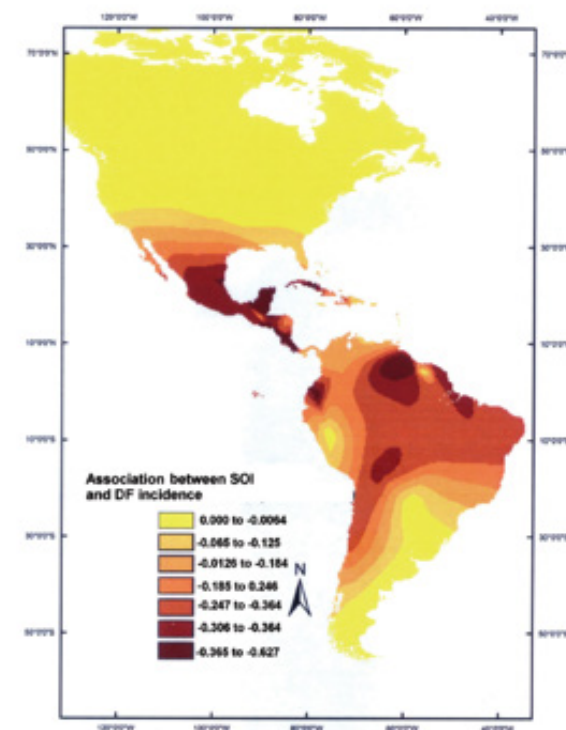
Periódicamente, irrumpen aguas cálidas provenientes del norte en la zona costera de Perú y Ecuador, y desplazan a las aguas frías de la corriente de Humboldt característica de la zona. Ese cambio no solo origina lluvias intensas en la región, sino que su impacto es global. La Figura 4-25 ilustra el fenómeno, mientras que a continuación se muestran los efectos del ENSO y de La Niña, fenómeno que suele seguir a El Niño y que se puede visualizar como la fase fría del ENSO. Una excelente animación de la dinámica de El Niño y de La Niña se puede encontrar en http://esminfo.prenhall.com/science/geoanimations/animations/26_NiñoNiña.swf.

Las consecuencias socio-económicas del ENSO son muy grandes. Para dar solo un ejemplo, se ha encontrado una correlación positiva entre el fenómeno y el número de casos de dengue en países del norte de Sudamérica y de Centroamérica. La Figura 4-26 muestra esa correlación; los tonos rojos indican una correlación más fuerte en el índice que mide la intensidad del ENSO y la tasa de casos de dengue, en el período 1995-2004 (Ferreira, 2014).

4.4.6. Fenómenos climáticos afectados por la actividad humana: el cambio climático global

Centrando la atención en la escala global, el cambio climático es el fenómeno más preocupante. Como existe alguna confusión entre las expresiones cambio climático, calentamiento global y efecto invernadero, los tres términos se explican en el Cuadro 4-4. El fenómeno más general es el cambio climático global, y nos enfocaremos en las bases fisicoquímicas del fenómeno. Para ello, seguiremos las conclusiones del último informe del Panel Internacional sobre Cambio Climático (IPCC, en inglés). Buscaremos describir el camino que va desde la obtención de conocimiento científico de las ciencias fácticas, hasta el desarrollo de herramientas útiles para la gestión.

Figura 4-25. Correlación entre la incidencia del dengue y la intensidad del ENSO en el período (1995-2004).



Cuadro 4-4

Efecto Invernadero, Cambio Climático y Calentamiento Global

Las tres expresiones se refieren a fenómenos vinculados entre sí, pero distintos.

El *efecto invernadero* es un fenómeno que producen ciertos gases atmosféricos (dióxido de carbono, vapor de agua, metano, etc.), de reflejar la radiación infrarroja, evitando un enfriamiento más importante de la superficie de la Tierra (ver Capítulo 2). Es

similar al logrado por el plástico de los invernaderos. El efecto invernadero permite que la superficie terrestre tenga las temperaturas actuales; caso contrario, las mismas serían mucho más bajas.

El *Cambio Climático* es un fenómeno que puede reconocer orígenes naturales, como las variaciones de la actividad solar. En la historia geológica del planeta ha habido una serie de episodios de cambios en el clima, los más conocidos son las glaciaciones. Hacia fines del Siglo XX se reconoció que, por primera vez, la actividad antrópica podía producir un cambio climático, conclusión que en la actualidad parece estar bien fundamentada, especialmente a través de los informes del IPCC. La última información está en los cinco documentos del AR5 *Fifth Assessment Report 2013-2014*, disponible en <http://www.ipcc.ch>, incluida la contribución del Grupo de Trabajo 1, referido a las Bases de las Ciencias Físicas al Quinto Informe, *Climate Change 2013* (IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. ver <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Uq28nOKOIWQ>). Son manifestaciones del cambio climático: el aumento de frecuencia de los acontecimientos meteorológicos extremos (huracanes, sequías severas, etc.), cambios en la temperatura promedio y también fluctuaciones más extremas de las temperaturas.

¿Cuáles son los indicadores científicos que se usan para decidir qué es lo que está pasando con el clima? Como ya dijimos, el planeta está en constante cambio y el clima no es la excepción. En el pasado geológico ocurrieron cinco edades de hielo (glaciaciones). Es más, se entiende que en la actualidad nos encontramos en un estadio interglaciar dentro de la glaciación cuaternaria, estadio que comenzó con el Holoceno (ver Capítulo 1). Sobre la base de esta importante

variabilidad natural, debemos analizar entonces los ritmos de cambio de algunos indicadores que nos darán un panorama adecuado de la posible influencia antrópica sobre los cambios. Los indicadores usados son las variaciones de las temperaturas promedio, de las temperaturas máximas y mínimas, de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera, de las superficies cubiertas por hielos. ¿Cómo se mide la temperatura o la concentración atmosférica de dióxido de carbono de hace 800.000 años? Las técnicas usadas por los geólogos se basan habitualmente en mediciones hechas en el hielo de los glaciares, en función de la profundidad. Se extraen muestras perforando el casquete de hielo y se mide, por ejemplo, la concentración de deuterio, que es indicación de la temperatura, o la concentración de dióxido de carbono.

La Figura 4-27 muestra la evolución de la temperatura media y de la concentración de dióxido de carbono atmosférico en los últimos 800.000 años: el origen, a la izquierda corresponde al presente. Puede advertirse que existen fuertes variaciones cíclicas y que los dos parámetros están fuertemente correlacionados entre sí.

A primera vista, no se observa un comportamiento cualitativamente distinto en la actualidad con respecto a lo que ocurrió varias veces en el pasado lejano. Sin embargo, la Figura 4-27 no muestra con claridad el notable incremento en la concentración de CO₂ en los últimos 80 años. Esos cambios se advierten mejor en la Figura 4-28, tomada de la página web de la NASA (<http://climate.nasa.gov/evidence/>) que muestra que se han superado los niveles registrados en los últimos 400.000 años (la Figura 4-28 muestra que ese periodo puede extenderse hasta 800.000 años).

Resulta también obvio que la velocidad del cambio es diferente. La Figura 4-29 muestra los registros promedio mensuales de dióxido de carbono atmosférico, obtenidos por el Scripps CO2 Program en el Observatorio de Mauna Loa en Hawái. La estructura de serrucho se debe a la variación estacional de la fotosíntesis, que consume CO2. Este proceso es más intenso en verano, y por eso en esos meses hay una caída de los valores medidos. La tendencia global es sin embargo de un

Figura 4-26

Arriba las fluctuaciones (anomalías) de la temperatura (°C) con respecto al promedio del último milenio. Abajo los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera en ppmv. En el eje horizontal, el tiempo en miles de años, medido desde el presente. Las líneas horizontales rayadas indican los promedios para cada periodo. Las finalizaciones de las glaciaciones se indican con la letra T. Tomado de Lüthi y col. 2008.

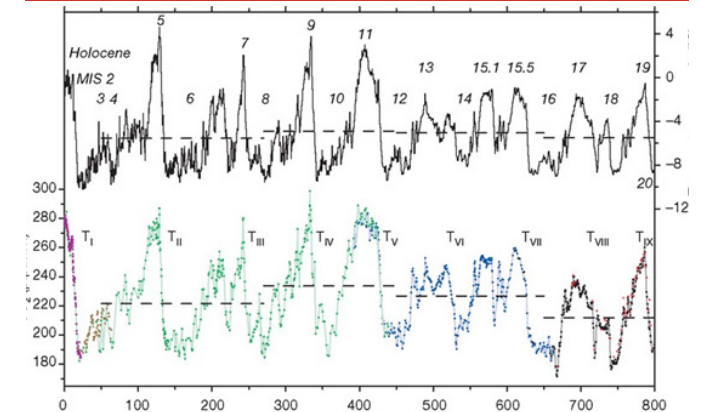
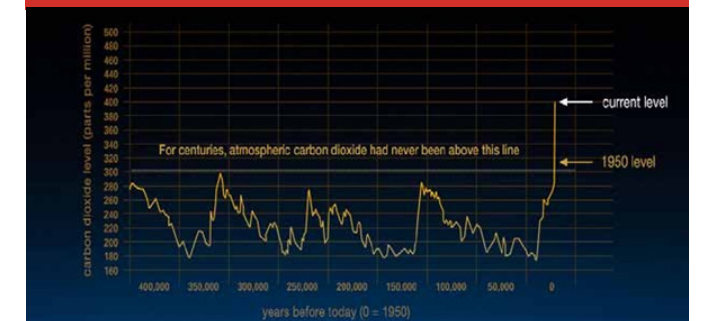


Figura 4-27

Evolución de los niveles de CO₂ en la atmósfera en los últimos 400.000 años. Tomada de la página web de la NASA, <http://climate.nasa.gov/evidence/>.

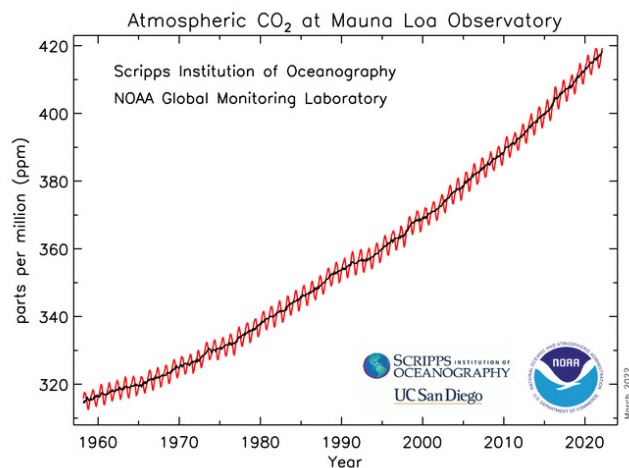


aumento monótono, que llega a superar los 400 ppm. En 60 años, los niveles han subido desde 315 hasta 410 ppm. Ese aumento, en la escala de la Figura 4-28

es una línea vertical, que se dispara con respecto a cualquier valor previo.

Figura 4-28

Valores mensuales promedio de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (expresada en ppm) desde 1958 hasta 2018. Ver: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>



Como se vio en el Capítulo 1, el dióxido de carbono es uno de los gases de efecto invernadero; un aumento de la concentración del dióxido de carbono produce un cambio en el forzante radiativo, y ello eventualmente conduce a un aumento en la temperatura de superficie. De allí que se vincule el incremento en la concentración de dióxido de carbono con la posibilidad de un calentamiento global.

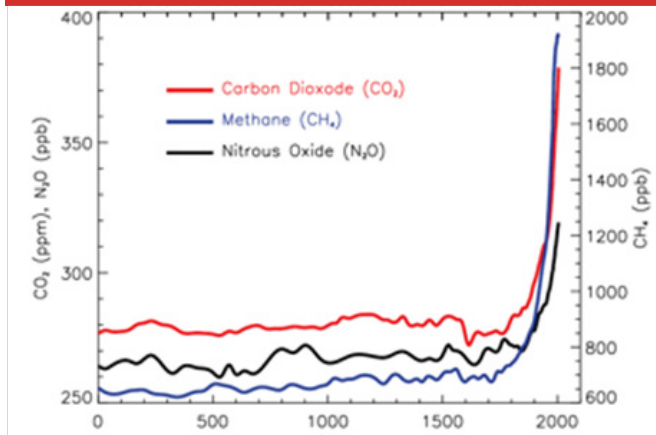
Las tendencias de la Figura 4-29 se reproducen para los otros gases de efecto invernadero, como se ve en la Figura 4-30.

En lo que sigue, nos ajustaremos a las conclusiones más recientes del IPCC (IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to

the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA).

Figura 4-29

Valores mensuales promedio de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (expresada en ppm) desde 1958 hasta 2018. Ver: http://scrippsco2.ucsd.edu/graphics_gallery/mauna_loa_record/mauna_loa_record.html



La primera conclusión de dicho informe dice:

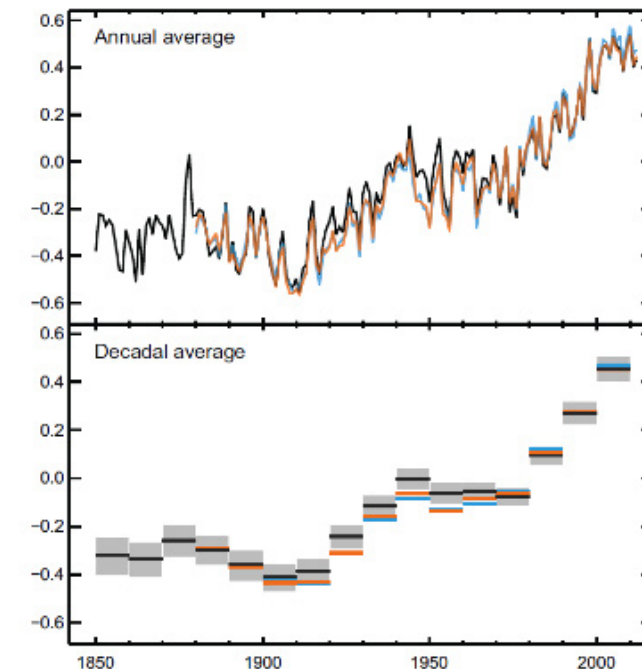
El calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde los años 50, muchos de los cambios observados no reconocen antecedentes durante periodos que van de décadas a milenios. La atmósfera y los océanos se han calentado, la cantidad de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar ha subido y las concentraciones de gases efecto invernadero han aumentado.

La última conclusión se basa en las mediciones mostradas en la Figura 4-27, y también en mediciones realizadas en el Polo Sur. Las figuras que siguen ilustran las conclusiones restantes.

La Figura 4-31 muestra la evolución de la temperatura promedio desde 1850. La parte superior muestra los promedios anuales, mientras que la parte inferior muestra los promedios de cada década. Los trazos de distintos colores corresponden a tres conjuntos de datos diferentes. La escala vertical se ubicó en cero en el valor promedio de la temperatura para el periodo 1961-1990, y muestra por lo tanto lo que se llama anomalías de temperatura.

Figura 4-30

Anomalías de temperaturas entre 1850 y 2010, tomando como referencia el promedio del periodo 1961-1990. Arriba, promedios anuales; abajo, promedios por décadas.

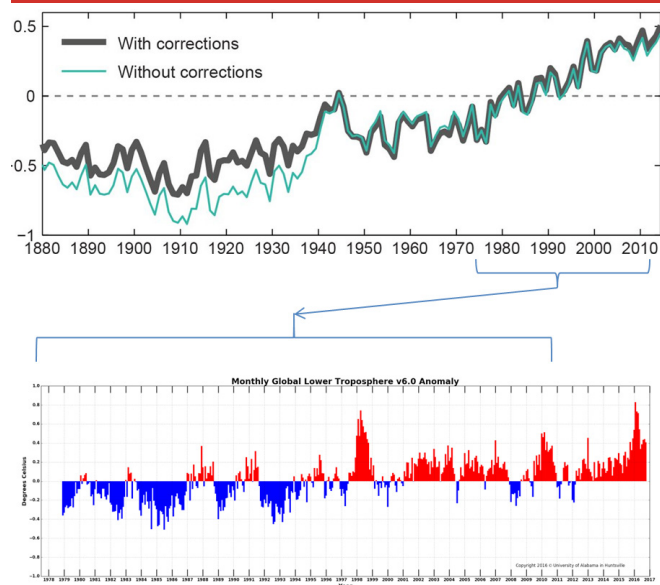


La Figura 4-32 muestra información similar entre 1880 y la fecha. En su parte inferior se muestra expandida la información referida a los últimos 40 años; esta última fue tomada de la publicación de la Universidad de Alabama en Huntsville (<http://www.nsstc.uah.edu/>)

climate/).

Figura 4-31

Evolución de la anomalía de temperatura



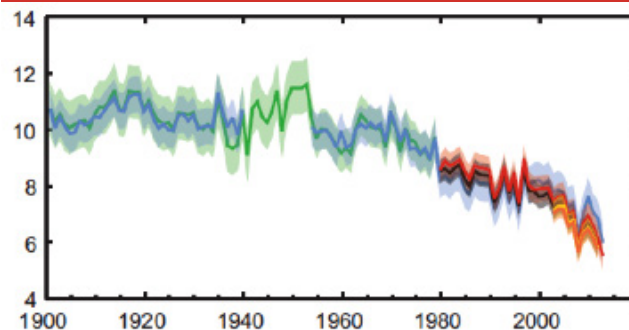
La Figura 4-33 muestra la evolución de la superficie del mar Ártico cubierta por hielo en verano. El promedio de la primera mitad del siglo XX se ubica por encima de 10.000.000 km², y puede apreciarse una disminución que en 2012 ya era del orden del 35-40%. El 1 de enero de 2018 la extensión fue de 540.000 km² (ver: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>), equivalente a una disminución del 46%.

Al respecto, el Informe precisa que la velocidad promedio de pérdida de hielo de glaciares en todo el mundo, excluyendo glaciares en la periferia de capas de hielo, fue muy probablemente 226 (entre 91 y 361) gigatoneladas por año durante el periodo 1971 a 2009, y muy probablemente 275 (entre 140 y 410) gigatoneladas por año durante el periodo 1993 a 2009. La redacción refleja cuidadosamente el grado de incertidumbre de los números indicados: por un lado, se indica entre paréntesis los límites posibles de la incerteza, y por otro se usa la expresión muy

probablemente (en bastardilla, very likely en inglés) que tiene un significado muy preciso: 90 a 100% de probabilidad.

Figura 4-32

Superficie del mar Ártico cubierta en verano con hielo (en millones de km²) entre 1990 y 2013.



Las mediciones en la Antártida también muestran una disminución de la cubierta de hielo. El Informe establece que la velocidad promedio de pérdida de hielo en este caso probablemente aumentó desde 30 (entre -37 y 97) gigatoneladas por año durante el periodo 1992-2001 a 147 (72 a 221) gigatoneladas por año durante el periodo 2001 a 2011. Existe confianza muy alta que estas pérdidas son principalmente del norte de la Península Antártica y del sector del mar de Amudsen de la Antártida Occidental. Estos cambios reflejan a la tendencia local de aumento de la temperatura, que se muestra en la Figura 4-34, y que se concentra en Antártida Occidental; debe notarse sin embargo que los valores de aumento de la temperatura son muy pequeños y variables dentro del continente antártico.

Cuadro 4-3

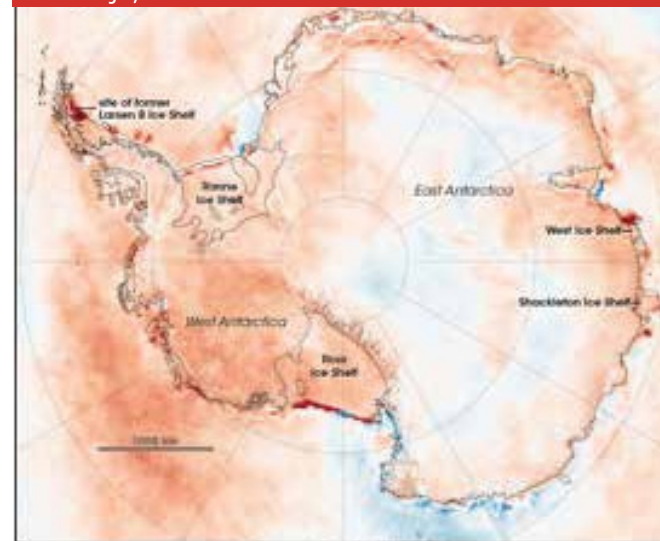
Mediciones, interpretaciones y subjetividad

El impacto ambiental de la actividad humana genera acalorados debates, y es frecuente encontrar opiniones irreductibles y grandes dificultades en el análisis desapasionado (si tal cosa es posible) de cada problema.

El tema de la evolución de la temperatura sirve para ilustrar las dificultades de obtener consenso científico para conclusiones que, basándose en información sujeta a niveles de incerteza importantes, muestran en el mejor de los casos tendencias muy débiles. Al día de hoy parece haber evidencias de que, en promedio, el continente antártico se está calentando. Michael Mann, Director del *Earth System Science Center de Penn State University* publicó la siguiente figura que indica un importante aumento de la temperatura, especialmente en la Península de Ross y en la Antártida Occidental. En contraste, la idea de que las temperaturas no están subiendo en ese continente, basadas en parte en la disminución observada en el polo Sur, se usaron para criticar la idea de calentamiento por origen antrópico.

Figura 4-33

Evolución anual de la temperatura en la Antártida, desde 1981 hasta 2007. Imagen construida por la NASA sobre la base de mediciones satelitales de infrarrojo, Ver:



Michael Mann fue quien propuso el famoso gráfico del palo de hockey, que recoge una reconstrucción de datos de temperatura desde el año 1000, y que muestra una curva descendente suave que culmina con una abrupta subida, semejando al palo de hockey sobre hielo. Ese gráfico, que se muestra en la Figura 4-35 y que fue ampliamente usado por Al Gore en su campaña pública sobre el calentamiento global, generó una encendida controversia sobre la validez de los datos y su interpretación.

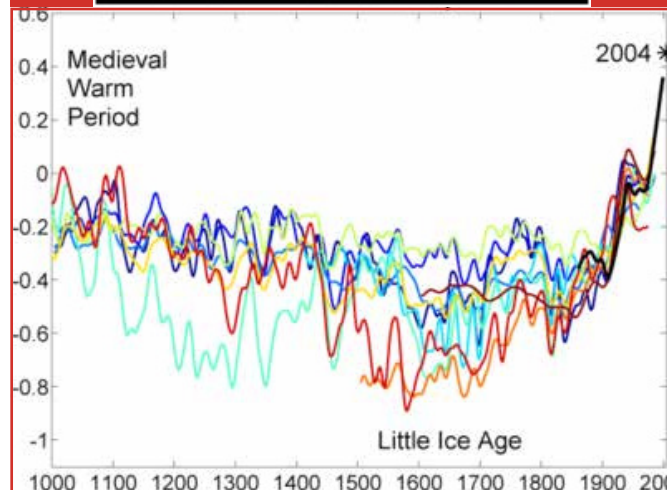
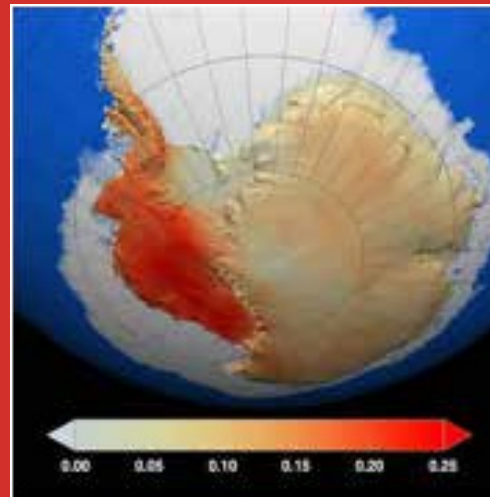
Es posible encontrar en la actualidad material publicado por los llamados "negadores del cambio climático", que esencialmente señalan los siguientes aspectos:

- La información sobre aumentos en la temperatura de la superficie terrestre selecciona ciertas mediciones e ignora otras. En particular, se ha señalado que las mediciones satelitales no corroboran un calentamiento. Este tema aun hoy es motivo de debate.
- Los modelos de la evolución del clima son simplemente eso, modelos, con altos errores intrínsecos y dudosa validez.
- No está demostrado que un eventual cambio climático, con o sin influencias antrópicas, tenga efectos negativos. Es posible incluso que los efectos sean beneficiosos.
- Aun en caso de efectos negativos de un eventual cambio climático, las medidas propuestas para mitigar sus consecuencias tienen efectos negativos más graves que el mismo cambio climático.

El ejemplo paradigmático de esta postura es el Heartland Institute de Chicago, EE.UU. Este Instituto actúa esencialmente como grupo de presión (lobby) en diversos temas, con posturas que lo acercan a la derecha del partido republicano. Sus posturas pueden verse en su página web: <https://www.heartland.org/>. La asunción del Presidente Trump en EE.UU. en 2017 significó un fortalecimiento de estas posturas.

Figura 4-34

Arriba: aumento en la temperatura de la Antártida. Abajo: Evolución de la temperatura en el segundo milenio según Michael Mann



Por el contrario, la postura pública del Papa Francisco sobre el cambio climático en su encíclica *Laudatio Si'* es un fuerte llamado a la acción sobre la base de la aceptación de la evidencia científica y de la

preocupación por el impacto que tendrá el cambio climático en los sectores más desprotegidos. Veamos algunas citas de la encíclica:

El clima es un bien común, de todos y para todos. A nivel global, es un sistema complejo relacionado con muchas condiciones esenciales para la vida humana. Hay un consenso científico muy consistente que indica que nos encontramos ante un preocupante calentamiento del sistema climático.

El cambio climático es un problema global con graves dimensiones ambientales, sociales, económicas, distributivas y políticas, y plantea uno de los principales desafíos actuales para la humanidad. Los peores impactos probablemente recaerán en las próximas décadas sobre los países en desarrollo. Muchos pobres viven en lugares particularmente afectados por fenómenos relacionados con el calentamiento, y sus medios de subsistencia dependen fuertemente de las reservas naturales y de los servicios ecosistémicos, como la agricultura, la pesca y los recursos forestales.

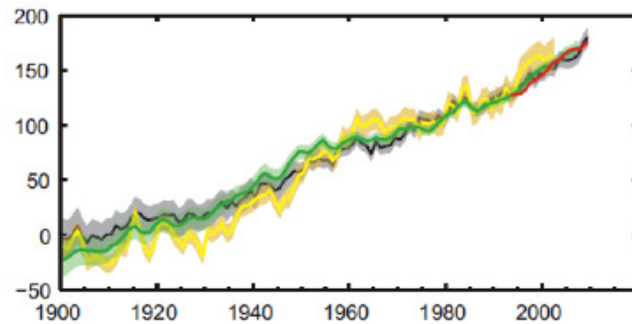
(ver: http://w2.vatican.va/content/francesco/es/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_ enciclica-laudato-si.html)

Es frecuentemente difícil poder distinguir entre los condicionamientos científicos y los condicionamientos políticos en la construcción de nuestras opiniones en temas ambientales. El análisis crítico de los paneles internacionales es la mejor base que disponemos para un análisis racional, sin dejar de reconocer que las conclusiones de dichos paneles no constituyen "verdades reveladas".

La Figura 4-36 muestra la evolución global promediada del nivel del mar. Puede apreciarse que dicho nivel subió alrededor de 15 cm durante el siglo XX, y continúa subiendo.

Figura 4-35

Aumento del nivel del mar (promedio global) desde 1900, en milímetros

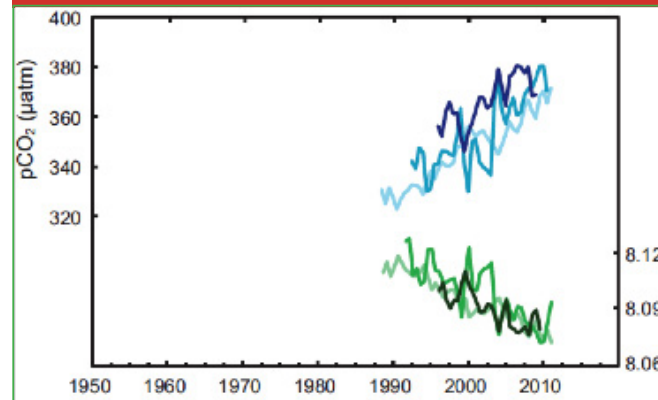


En las aguas superficiales de los océanos se observa también una acidificación importante que acompaña a la incorporación de dióxido de carbono desde la atmósfera. La Figura 4-37 muestra que el pH ha disminuido en los últimos 20 años y que la cantidad de dióxido de carbono aumentó más del 10%.

Otro Informe (IGBP, IOC, SCOR (2013)) indica que desde la Revolución Industrial el pH del agua en los mares ha disminuido 0,1 unidades, de 8,2 a 8,1; de seguir aumentando el contenido atmosférico de CO₂, la disminución del pH puede ser más marcada aun, como lo muestra la Figura 4-38. Debe recordarse que el pH es una escala logarítmica, de modo que 0,1 unidades de variación implican un cambio importante en la acidez. Por ejemplo, al pasar de 8,2 a 8,1, la concentración de protones varía desde 6,3 hasta 7,9 nanomolar.

Figura 4-36

Variación en las aguas oceánicas superficiales durante los últimos 25 años de la concentración de dióxido de carbono disuelto (arriba, escala vertical a la izquierda) y del pH (abajo, escala vertical a la derecha). Los trazos de distintos colores corresponden a diferentes puntos de muestreo, dos en el Océano Atlántico y una en el Pacífico.



El informe de Stocker y col. (2013) analiza las causas del cambio climático o, con más precisión, las fuerzas impulsoras (drivers, en inglés) que están causando los efectos observados. Al enfocarse en el forzante radiativo RF (definido como el cambio cuantitativo en el flujo de energía, producido por cada fuerza impulsora, ver Capítulo 2, Sección 10) concluye que:

El forzante radiativo total es positivo y ha conducido a una entrega de energía al sistema climático. El aumento de la concentración atmosférica de CO₂ desde 1750 causa la contribución más grande al forzante radiativo total. La Figura 4-39 resume los distintos forzantes radiativos, identificados en función de las emisiones.

Figura 4-37

El óvalo grande muestra el océano en 2100, y el óvalo pequeño en 1850. El pH se indica en un código de colores que muestra valores de alrededor de 8,2 en 1850 y tendiendo a 7,7 en 2100 (IGBP, IOC, SCOR (2013), página 6).

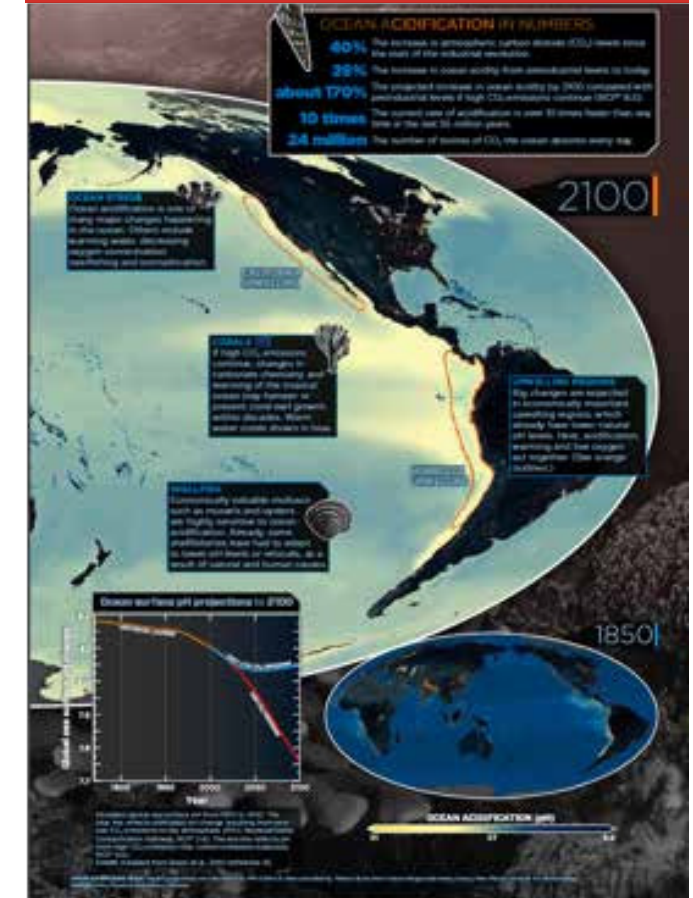
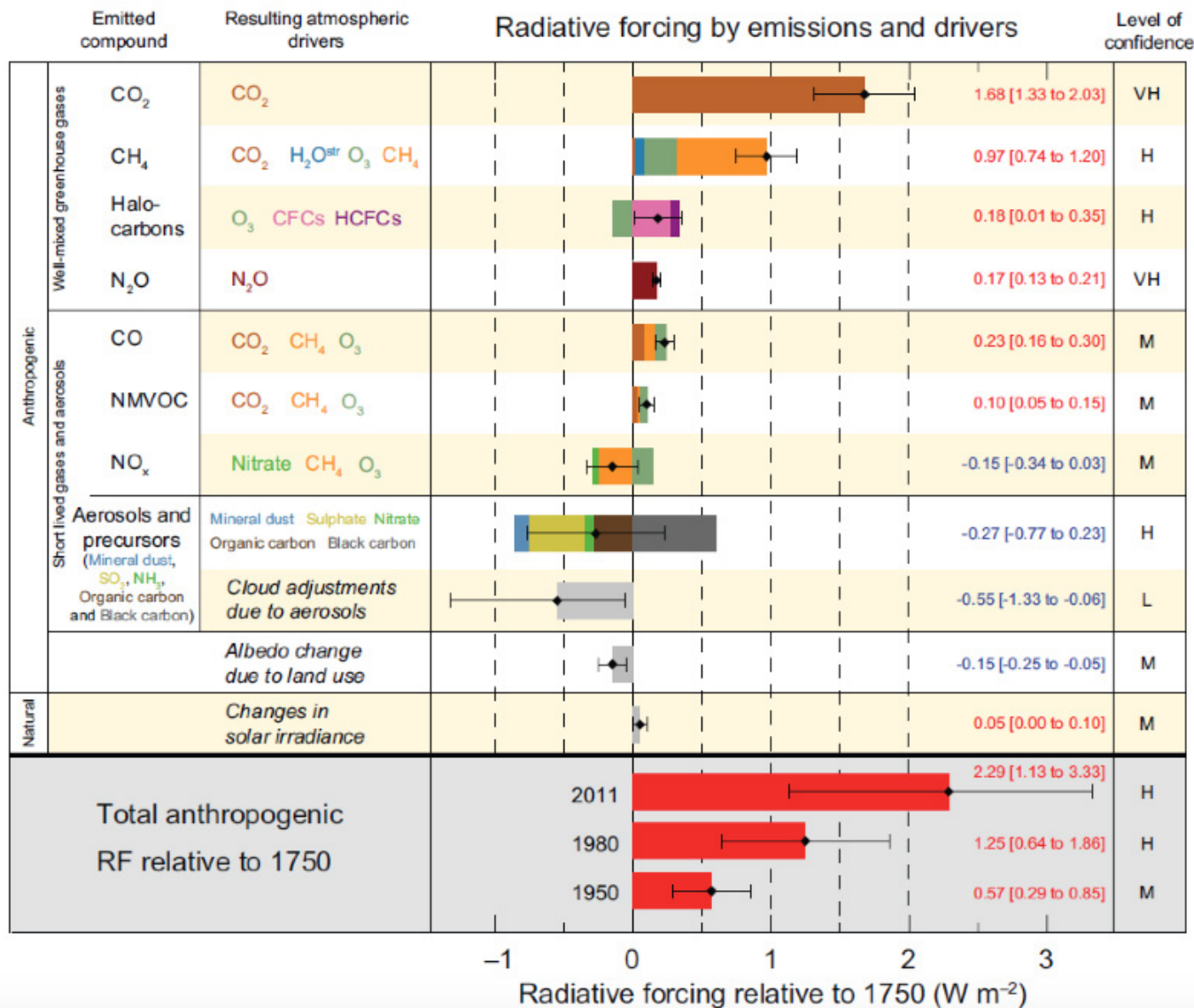


Figura 4-38

Forzantes radiativos. Se detallan forzantes de origen antrópico y naturales. Dentro de los primeros, los más importantes son las emisiones de CO₂, parcialmente compensada por el efecto de aerosoles. La incerteza más grande corresponde al efecto de los aerosoles sobre las nubes. Para más detalles, ver la publicación original (Stocker y col. 2013).



Sobre la base de la información recolectada y analizada críticamente, el Informe avanza desarrollando modelos que describen las evoluciones observadas de los parámetros ambientales. Se señala que los modelos pueden ahora describir bien las oscilaciones del sistema El Niño, la disminución de los hielos en el Ártico y el enfriamiento producido por la emisión de cenizas volcánicas.

La Figura 4-40 compara las mediciones con las predicciones de los modelos con y sin efectos antrópicos.

Para poder formular predicciones sobre la evolución del clima en el mediano y largo plazo se emplean modelos de diversa complejidad. La conclusión central es:

La emisión continuada de gases efecto invernadero producirá más calentamiento y cambios en todos los componentes del sistema climático. Se requieren reducciones substanciales y sostenidas de las emisiones de gases efecto invernadero para limitar el cambio climático.

La Figura 4-41 muestra las principales conclusiones sobre las predicciones de los modelos. Se analizaron cuatro modelos, conocidos por los códigos RCP2.6, RPC4.5, RPC6.0 y RPC8.5.

Una de las tendencias preocupantes es el aumento del nivel del mar. La Figura 4-42 muestra los resultados de los modelos analizados.

Figura 4-39

Comparación de la evolución observada (líneas de trazos) con las predicciones de los modelos: en azul, modelos sin influencias antrópicas; en rosa, modelos con influencias antrópicas. Adviértase que los modelos tienen un margen de incertezza amplio. Se muestra a la izquierda la temperatura de la superficie terrestre, al medio la temperatura promediada en mares y tierra; a la derecha, el contenido calórico de los océanos.

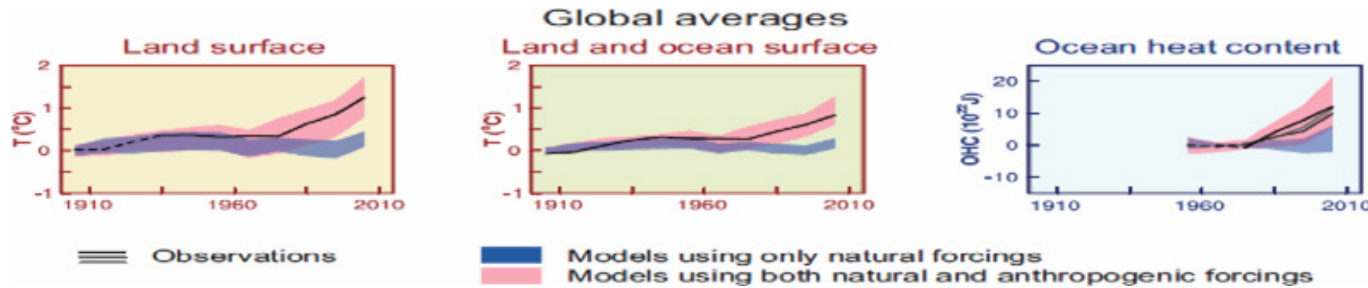


Figura 4-40

Arriba: Cambio en la temperatura promedio global en superficie según dos modelos. Medio: Superficie cubierta por los hielos en septiembre en el hemisferio norte (en millones de km²) según cuatro modelos. Abajo: Variación del pH (promedio global) de aguas oceánicas superficiales según dos modelos.

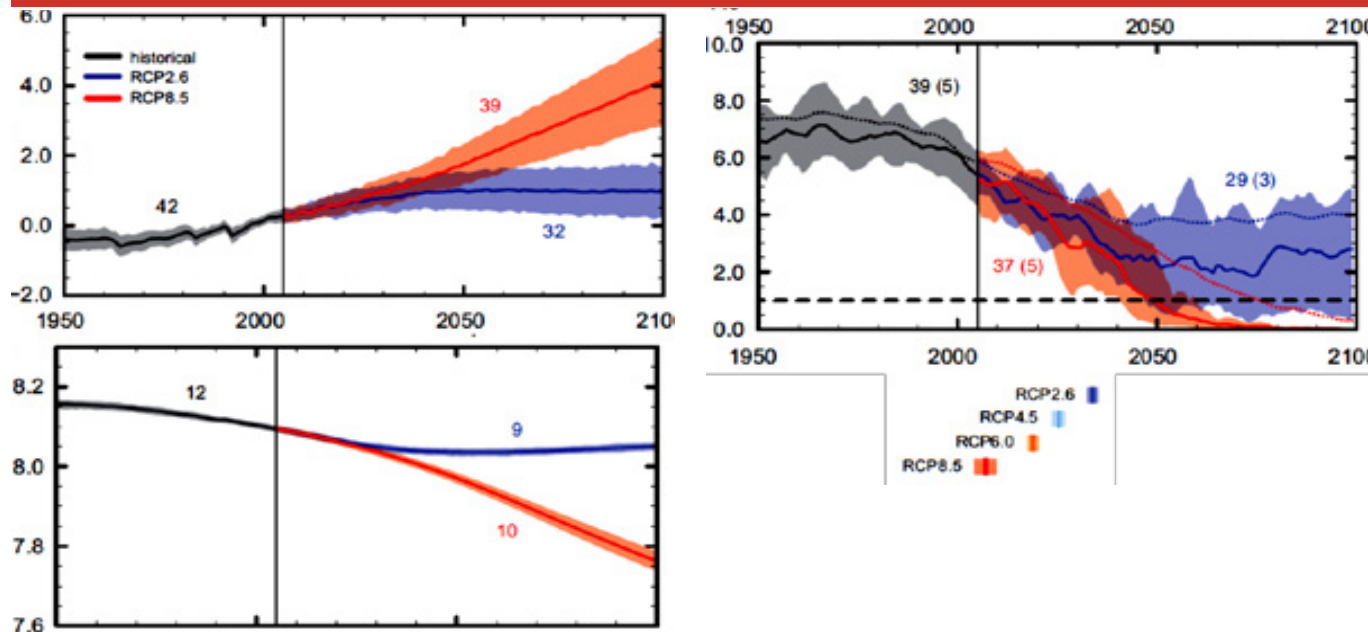
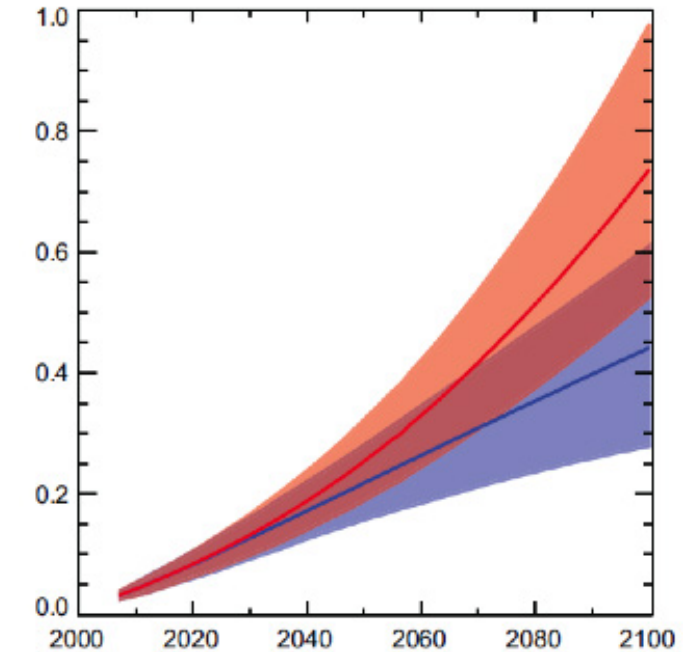


Figura 4-41

Variación del nivel del mar (en metros) según los modelos analizados



4.5. Bibliografía

Blesa M.A. (2010). Grandes temas ambientales. Introducción General. Publicación electrónica, Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. http://aargentinpnciencias.org//index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=56&Itemid=93.

Ehrlich P.R., Ehrlich A.H. (1990). *The Population Explosion*, Simon and Schuster, New York (1990). Hay traducción al español: *La Explosión Demográfica*, Biblioteca Científica Salvat, Salvat Editores, Barcelona (1990). ISBN: 84-345-8880-3.

Ferreira M.C. (2014). *Geographical distribution of the association between El Niño South Oscillation and dengue fever in the Americas: a continental analysis using geographical information system-based techniques*. *Geospatial Health* 9(1), pp. 141-151

- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, R. Van Dorland, 2007: *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. En: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA.
- Goldstein B., Birkved M., Quitzau M.-B., Hauschild M. (2013). *Quantification of urban metabolism through coupling with the life cycle assessment framework: concept development and case study*. Environmental Research Letters 8 035024 doi:10.1088/1748-9326/8/3/035024.
- Herrera A., Scolnik H., Chichilnisky G., Gallopin G., Hardoy J., Mosovich, D., Oteiza E., Romero Brest G., Suárez C., Talavera L., 1977 *¿Catástrofe o Nueva Sociedad? - El Modelo Mundial Latinoamericano*, versión en inglés 1976 y versión en español 1977, International Development Research Centre, Ottawa; Edición japonesa de 1976, Tokio; Edición francesa Presses Universitaire de France de 1976; Edición alemana Grenzen des Elends Das Bariloche-Modell, Ed. S. Ficher, Frankfurt, 1977.
- Hobsbawm E.J. (1991), *La Era de la Revolución (1889-1848)*, Editorial Labor, Barcelona.
- Korotayev A., Malkov A., Khalitourina D. 2006. *Introduction to Social Macrodynamics: Compact Macro-models of the World System Growth*. Editorial URSS, Moscú, 128 p.
- IGBP, IOC, SCOR (2013). *Ocean Acidification Summary for Policymakers*. Third Symposium on the Ocean in a High-CO2 World. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, Suecia.
- Lewis S.L., Maslin M.A. (2015). *Defining the Anthropocene*. Nature 519,171-180; doi:10.1038/nature14258.
- Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Barnola J.-M., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Kawamura K., Stocker T.F. (2008). *High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present* Nature 453, 379-382; doi:10.1038/nature0694.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens III W. W. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books, 1972.
- Schulte P. y col (2010). *The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary*. Science 327, 1214-1218.
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Editores). 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA).
- Wake D.B., Vredenburg V.T. (2008) *Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 105 suppl. 1, 11466 -11473
- Zalasiewicz J., Williams M., Steffen W., Crutzen P. 2010. *The New World of the Anthropocene*. Environmental Science and Technology 44, 2228-2231

5. LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

5.1. Introducción

Los seres vivos son sistemas abiertos, intercambian materia y energía con el medio que los rodea. Las sustancias químicas que toma del medio son idealmente las que necesita para su metabolismo, y elimina sus desechos. Por ejemplo, una planta fotosintética toma dióxido de carbono y agua de la atmósfera, y elimina oxígeno. También toma nutrientes del suelo y descarga al mismo sustancias que son desechos. Los organismos dependen pues del medio para proveerse de las sustancias que necesitan y para desechar las que no necesitan. A eso se suma que el hombre, ya no solo con sus funciones metabólicas sino con su actividad fabril, es capaz de alterar las sustancias naturales, crear nuevas (las sustancias xenobióticas) y descargarlas al ambiente.

El ambiente en el que se desarrolla un organismo vivo puede por lo tanto contener una cantidad muy grande de sustancias químicas. La evolución conduce al uso óptimo de las sustancias presentes en el ambiente para el desarrollo de la especie. Las sustancias que son útiles son aprovechadas, y se desarrollan defensas contra las que representan riesgos. Se puede decir que cada organismo está optimizado para desarrollarse en un determinado medio. Sin embargo, la composición química del medio puede variar. El conjunto de condiciones abióticas (el biotopo) puede cambiar en el tiempo en un determinado lugar, o las condiciones pueden cambiar por migración del organismo a otro ambiente. Los factores bióticos del ambiente también pueden cambiar en el tiempo y en el espacio.

5.2. Background o Fondo Natural

Las sustancias químicas de origen natural o antrópico se distribuyen en el ambiente en un intervalo de concentraciones. Ocasionalmente esa distribución es normal o Gaussiana (número de determinaciones vs concentración puede ser ajustado por una campana de

Gauss). La mayoría de las veces resulta log normal. En ausencia de procesos antrópicos significativos, la caracterización de dicha distribución recibe el nombre de Fondo Natural o "background".

La determinación del Fondo Natural resulta indispensable para: la identificación de yacimientos mineros; la evaluación de los impactos ambientales de actividades antrópicas en un determinado emplazamiento; la definición de nivel de "clean up" en el diseño e implementación de proyectos de remediación; y, en la definición de ambientes prístinos o naturales, entre otros.

Para los metales, la concentración en las rocas de la superficie de la corteza terrestre está asociada a la abundancia de los minerales que los contienen. Se emplean imágenes satelitales para la identificación de zonas favorables para el descubrimiento de yacimientos mineros, en las cuales las concentraciones de los metales se encuentran por sobre el fondo natural de los mismos en el ambiente circundante (reciben el nombre de anomalías). El agua que los atraviesa se enriquece en los mismos, así como el material particulado suspendido en aire; y, la biota que allí se desarrolla, se adapta a dichas condiciones.

Cuando las sustancias químicas naturales se movilizan desde sus fuentes, a través de rutas migratorias que involucran a distintos factores ambientales, hasta receptores vulnerables a las mismas (el hombre, la biota no adaptada al ambiente donde se encuentran las fuentes) se convierten en contaminantes naturales o sustancias tóxicas de origen natural. Los factores ambientales que forman parte de dicha ruta migratoria pierden parte o la totalidad de las aptitudes de uso definidas por la legislación vigente para aire, agua y suelo.

5.3. Sustancias tóxicas de origen natural

El arsénico es una sustancia tóxica de origen natural presente en aguas superficiales y subterráneas de gran parte del territorio argentino (ver Cuadro 1). Otro ejemplo importante es la contaminación del aire, del

agua y del suelo por las "cenizas" y otras sustancias emitidas durante una erupción volcánica (ver Cuadro 3).

Cuando el origen de una sustancia en un factor ambiental es natural, se habla de enriquecimiento. Los factores ambientales enriquecidos pierden aptitudes de uso. En algunos casos, el origen de esas sustancias nocivas puede ser abiótico (no relacionado con la actividad biológica); tal es el caso, por ejemplo, de la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de gran parte del territorio argentino (ver Cuadro 1). En este caso, el arsénico natural limita la aptitud de uso de cuerpos de agua subterránea en Llanura Pampeana como fuente de agua para consumo humano con tratamiento convencional.

Cuadro 5-1

El arsénico en aguas naturales. El Hidroarsenicismo Regional Crónico Endémico (HACRE)

Las aguas naturales pueden poseer elevados tenores de arsénico, aun sin la intervención del hombre. El agua de mar contiene del orden de 1,5 mg/L, y las aguas dulces superficiales habitualmente menos de 1 mg/L. Sin embargo, en cuencas endorreicas como las del río San Antonio de los Cobres, en Salta, afectadas por manifestaciones geotermales, pueden encontrarse valores mucho más elevados (superiores a 50 mg/L). De la misma manera, las aguas superficiales de la II Región de Chile (Antofagasta, Calama, Tocopilla, Mejillones) tienen contenidos de arsénico de hasta 800 mg/L. Las aguas subterráneas pueden tener tenores muy elevados; dependiendo de la geología del lugar, los niveles pueden ser tan bajos como 0,5 mg/L o llegar a valores como los medidos en Campo de Géiseres El Tatio en el norte chileno, que llegan a cifras tan extremas como 30.000 mg/L.

El arsénico puede ser ingerido bebiendo agua contaminada, o alimentos ricos en este elemento. En particular, los pescados y mariscos pueden contener hasta 100 mg/kg. En este caso, se trata en general de compuestos orgánicos de arsénico de baja toxicidad,

como la arsenobetaina, $(\text{CH}_3)_3\text{As}-\text{CH}_2-\text{CO}_2^-$.

El arsénico de las aguas naturales es arsénico inorgánico. Dependiendo de las condiciones de oxigenación de las aguas, se puede encontrar como arsénico oxidado (estado de oxidación 5+, As(V)) o reducido (estado de oxidación 3+, As(III)). El arsénico inorgánico es más tóxico que el orgánico que se encuentra en los alimentos, y el As(III) es más tóxico que el As(V) . Algunos compuestos orgánicos sencillos (que no se encuentran en los alimentos), como la arsina, AsH_3 , la monometilarsina, $(\text{CH}_3)\text{AsH}_2$ y la dimetilarsina, $(\text{CH}_3)_2\text{As}$ son más tóxicos que el As(V) . La dosis letal para humanos del As_2O_3 es del orden de 1,5 mg/kg de peso.

Si bien se ha informado algún caso de intoxicación aguda por ingesta de aguas de pozo con muy alto tenor de arsénico, el problema sanitario más serio se refiere a la ingesta crónica de aguas con niveles intermedios de este elemento. En nuestro país este síndrome se conoce como Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), y fue descrito por primera vez en la localidad cordobesa de Bell Ville en 1913, por el médico Mario Goyenechea quien combinó los resultados de los análisis químicos de Agustín Pusso con sus propias observaciones clínicas. La descripción detallada de síntomas la hizo Ayers en 1917.

La OMS reconoce como síntomas de la intoxicación crónica con arsénico lesiones de la piel como hiper e hipopigmentación, neuropatía periférica, cáncer de piel, cáncer de vejiga y de pulmón, enfermedad vascular periférica. Las lesiones de la piel son los síntomas más usuales y requieren de varios años de consumo para su manifestación. La Figura 5-1 muestra dos ejemplos.

Los niveles altos de arsénico en agua afectan muchas regiones del mundo, como puede verse en la Figura 5-2. Taiwan, Bengala del Oeste (en India) y Bangladés, por la densidad de población y por los niveles medidos de As, son las regiones más afectadas.

Figura 5-1

Queratosis arsenical. La foto de la izquierda es un caso de la India, tomado de la referencia D.N. Guha Mazumder, Chronic arsenic toxicity & human health, Indian J. Med. Res. 128, 436-447 (2008). La foto de la derecha es un caso en Santiago del Estero, tomado de la página del médico rural Carlos Alberto Padial, <http://www.hidroarsenicismo.com.ar>



Figura 5-2

Mapa del arsénico en agua. Tomado de Smedley y Kinniburgh (2002)



Cuadro 5-2

El arsénico, la gestión del agua y la lección de Bangladés

Con el auspicio conjunto del Programa Ambiental de las Naciones Unidas (en inglés, UNEP), la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la Organización Mundial de la Salud, el International Programme on Chemical Safety (IPCS) produjo en 2001 un exhaustivo informe sobre los efectos toxicológicos del arsénico (IPCS 2001).

Sobre esta base, la OMS analizó los criterios para escoger valores guía para arsénico en agua. La OMS concluye que no se conocen bien los mecanismos de acción del arsénico, aunque queda establecido que existe una relación causal entre la exposición prolongada al arsénico en el agua de consumo humano y un aumento en el riesgo de contraer cáncer de piel, vejiga, pulmón y riñón y de otras afecciones de la piel como hiperqueratosis y cambios en la pigmentación. La falta de información precisa sobre la posible incidencia de niveles moderados, lleva a la OMS a basar sus recomendaciones en un criterio precautorio sumado a las posibilidades reales de las tecnologías para abatir el arsénico. Se concluye que:

En vista de las incertezas significativas que rodean la evaluación del riesgo para la carcinogenicidad por arsénico, y las dificultades prácticas para remover el arsénico del agua de consumo humano, se conserva el valor guía de 10 mg/L. En vista de las incertezas científicas, se designa este valor guía como provisorio. En muchos países, puede no ser posible alcanzar este valor guía; cuando sea éste el caso, deben realizarse todos los esfuerzos posibles para mantener las concentraciones tan bajas como sea posible. (Traducción libre)

La gestión del hidroarsenicismo en Argentina refleja claramente las dificultades originadas tanto en el comportamiento de los sistemas naturales como en los factores sociales.

En la Argentina, la cantidad de personas potencialmente afectadas por los niveles de arsénico en las fuentes de agua de consumo es muy grande. Se ha estimado que el 5% de la población puede sufrir este problema (del orden de 2.000.000 de personas expuestas a niveles intermedios, ver Bundschuh y col. 2008). En efecto, en grandes extensiones del territorio nacional las aguas subterráneas contienen niveles relativamente elevados de arsénico. Los hidrogeólogos han caracterizado y analizado la seriedad del problema en la llanura chaco-pampeana, en la provincia geológica de la Puna, en Cuyo, y, con menor cantidad de información, en la Patagonia (Bundschuh y col. 2008). Por la cantidad de habitantes, el impacto del arsénico en la llanura chaco-pampeana es el que ha concitado más atención. Es especial, la toma de conciencia de que el problema también afecta a la provincia de Buenos Aires es sólo reciente.

El Código Alimentario Argentino (CAA) en su Artículo 982 (Res Conj. SPRyRS y SAGPyA N° 68/2007 y N° 196/2007, que se puede consultar en la página web <http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/125000-129999/128630/norma.htm>) establece 0,010 mg/L (10 µg/L) como valor máximo de la concentración de arsénico en el agua potable. Sin embargo, en línea con lo establecido por la OMS aclara que:

La autoridad sanitaria competente podrá admitir valores distintos si la composición normal del agua de la zona y la imposibilidad de aplicar tecnologías de corrección lo hicieran necesario.

Para aquellas regiones del país con suelos de alto contenido de arsénico, se establece un plazo de hasta 5 años para adecuarse al valor de 0,01 mg/L.

En consecuencia, en la práctica sigue vigente el límite de 0,05 mg/L.

El cambio del valor límite reconoce su origen en el principio precautorio, en vista de las incertidumbres en los efectos toxicológicos a largo plazo. El nuevo

límite, como lo establece la OMS, reconoce más el estado del arte en las tecnologías de abatimiento de arsénico en los países centrales, y las dificultades en la determinación de esos niveles de arsénico, que la evaluación precisa de la toxicidad en esos niveles. Se acepta que es muy difícil demostrar la incidencia epidemiológica del arsénico en esos niveles.

Para aguas minerales, el límite establecido por el CAA es de 0,2 mg/L, veinte veces más alto que para el agua distribuida por red.

El caso de Bangladés

En la década de 1970, UNICEF recomendó en Bangladés la instalación de tubos provistos de bombas manuales para la extracción de agua desde acuíferos ubicados a unos 200 m de profundidad. Se buscaba así resolver el serio problema sanitario causado por la contaminación microbiológica de las aguas superficiales. No se advirtió que los niveles de arsénico de las aguas profundas eran muy elevados; se comprobó más adelante, en 1998, que el 35% de los tubos tenían niveles de arsénico superiores a 50 mg/L, y que el 8,4% contenía arsénico por encima de 300 mg/L. Las primeras evidencias firmes de lesiones cutáneas en pobladores de Bangladés expuestos al arsénico se obtuvieron en 1987. La magnitud del problema, en función de los muy altos niveles de arsénico y de la cantidad de personas que estaban expuestas llevó a la OMS a caracterizar al mismo como el envenenamiento masivo más grande de la historia de la humanidad. La población expuesta se estima entre 35 y 77 millones de personas. (A.H. Smith, E.O. Lingas y M. Rahman, *Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency*, *Bulletin of the World Health Organization* 78 (9), 1093-1103 (2000)).

Las respuestas ante esta emergencia debieron tener en cuenta la realidad socioeconómica. Una batería de acciones permite una mejor solución que drásticas soluciones únicas. En primer lugar, la promoción de técnicas de desinfección de aguas superficiales, libres

de arsénico pueden proveer una respuesta parcial, aunque puede haber resistencia a la adopción de esta solución. La provisión de filtros hogareños sencillos también es una buena contribución. Muy importante, los niveles de arsénico varían mucho de un pozo a otro y un relevamiento adecuado permite identificar pozos aptos y pozos que deben clausurarse.

Como se dijo, la OMS ha establecido un valor guía de 10 mg/L; el valor establecido localmente es de 50 mg/L y ello está de acuerdo con las pautas de la OMS. Aun así, la OMS propone usar kits de medición en campo que son rápidos y baratos, pero que sólo detectan arsénico por encima de 100 mg/L. Está claro que, aun sin ser este límite el ideal, la gestión racional demanda de este tipo de soluciones pragmáticas.

Cuadro 5-3

Las erupciones y las emisiones volcánicas

En el Capítulo 2 describimos los volcanes. Las erupciones violentas pueden generar contaminación severa. En particular, las erupciones que arrojan material piroclástico a la atmósfera pueden producir contaminación atmosférica severa. La manifestación potencialmente más importante en eventos catastróficos es el efecto de filtro de la radiación solar (ver en Capítulo 4, Figura 23 la contribución del material particulado mineral al forzante radiativo). También hay efectos directos sobre la salud de los pobladores de las regiones próximas a la erupción, pérdidas de cosechas, etc. Finalmente, las "cenizas" volcánicas, que son en realidad pequeñas partículas con la dureza del vidrio, alcanzan la estratósfera, y su presencia implica un grave riesgo para la aviación, porque pueden dañar las turbinas; ello obliga a la suspensión de vuelos, y puede dejar aisladas las zonas durante largos tiempos, dificultando incluso la llegada de ayuda.

En la Argentina, las erupciones volcánicas de importancia más recientes fueron las de los volcanes de Hudson (1991 y en menor medida en 2011), El

Chaitén (2008-2009), Peteroa (2010), Puyehue (2011), y Copahue (2014). Las erupciones afectaron, respectivamente, a la Provincia de Santa Cruz; al Departamento Malargüe de la Provincia de Mendoza; a la región de Esquel (provincia de Chubut); y a la región de San Carlos de Bariloche, Villa La Angostura (provincia de Río Negro) y San Martín de los Andes (provincia de Neuquén). Todos estos volcanes se hallan o en territorio chileno o en la frontera entre Chile y Argentina. La dirección de los vientos produce importante impacto en territorio argentino, aunque, por supuesto, el mayor impacto de los volcanes chilenos es en territorio de ese país.

También puede haber contaminación química debida a la actividad de seres vivos, que generan sustancias tóxicas para otros organismos. Un ejemplo en este sentido es la marea roja, que se describe en el Cuadro 4. La contaminación debida a la actividad de seres vivos ilustra que el concepto es relativo: la misma sustancia puede ser imprescindible para ciertos organismos, y altamente tóxica para otros. Podemos dar como ejemplo el oxígeno atmosférico, generado por la fotosíntesis. El oxígeno es imprescindible para todos los animales, pero hay muchos microorganismos que no lo toleran; son los microorganismos anaerobios; ya hemos hablado en otro capítulo de los eventos de extinción masiva causados seguramente por cambios ambientales.

Cuadro 5-4

Floración de algas y fitoplancton. Marea roja

Al describir la dinámica poblacional (Capítulo 4) vimos que en ciertas condiciones se puede producir un crecimiento explosivo de la población. La floración de algas y de fitoplancton es un ejemplo muy notable. Estos organismos, presentes en la zona fótica de las aguas (cerca de la superficie), si encuentran las condiciones apropiadas pueden crecer de forma muy rápida y muy drástica. Dichas condiciones incluyen temperatura, salinidad, luz solar, y nutrientes en concentraciones adecuadas. Las floraciones se detienen cuando estas condiciones

cambian; la presencia de peces que se alimenten de ellas puede también prevenir el crecimiento. Las floraciones de algas pueden tener diversos efectos sobre el ecosistema. Aquí nos interesa sólo un tipo específico, el de las llamadas floraciones algales dañinas (HABS por sus siglas en inglés). En el curso de estas floraciones, se liberan toxinas diversas. Estas toxinas se acumulan especialmente en moluscos bivalvos, cuya ingesta puede desencadenar severos síntomas. La marea roja es causada por dinoflagelados, especies del grupo de las microalgas, y ocurre principalmente en ambientes costeros. En sentido estricto, la especie responsable de la marea roja es *Karenia brevis*, pero existen muchos otros organismos que generan toxinas, responsables de una serie de cuadros clínicos, como los neurológicos. El color rojo característico se debe a pigmentos presentes en los microorganismos. La marea roja produce mortandad de peces y pérdidas económicas muy importantes. El problema es de mucha actualidad en la costa atlántica argentina: el 04/12/2014 estaba vigente la prohibición de la Dirección Provincial de Control Pesquero de la Provincia de Buenos Aires, referida al consumo de moluscos bivalvos (berberechos, mejillones, almejas, cholgas, vieiras, ostras y caracoles) en el partido de Necochea y distritos vecinos por altos niveles de toxinas. Las biotoxinas fitoplanctónicas incluyen, entre otras, las toxinas paralizantes, diarreicas, neurotóxicas y amnésicas de los moluscos. La Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnologías Médicas (ANMAT) ha emitido recomendaciones sobre este tema (http://www.anmat.gov.ar/Alimentos/Marea_Roja.pdf).

Como las sustancias químicas tóxicas, también los microorganismos patógenos pueden ser de origen natural. Sin embargo, la contaminación microbiológica más importante es de origen antrópico y se discute en la sección 5.4.

Figura 5-3

Imagen de marea roja tomada de la página web de SENASA (<http://www.senasa.gov.ar/contenido.php?to=n&in=1445&io=11939>)



5.4. Contaminación de origen antrópico

5.4.1. Generalidades

La actividad antrópica ha generado un número muy grande de sustancias químicas que no existían en la naturaleza y un número importante de ellas que tienen efectos nocivos sobre distintos organismos vivos. La gestión de la contaminación apunta muy especialmente al control de estas sustancias y para ello se debe basar fuertemente en la comprensión de los efectos ecotoxicológicos de las mismas.

En los estudios ambientales subyace siempre un enfoque antropocéntrico: nos interesa primordialmente el bienestar de los seres humanos. La contaminación que más nos preocupa es la que impacta directamente sobre la salud humana, aunque lógicamente también importan las formas de contaminación que afectan a los ecosistemas de los cuales dependemos. Hasta no hace mucho, el impacto de la contaminación estaba esencialmente referido a la toxicidad de las sustancias

químicas, tema tratado en el Capítulo 4. Hacia finales del siglo XX, sin embargo, la actividad antrópica se ha demostrado capaz también de afectar el biotopo, y muy especialmente la atmósfera, generando el adelgazamiento de la capa de ozono (Capítulo 5) y afectando el cambio climático (Capítulo 5).

Para ordenar la discusión de la contaminación originada por el hombre, podemos usar varios criterios:

- Según influya sobre salud humana, sobre poblaciones de otras especies, sobre ecosistemas como un todo (incluyendo cambio global).
- Según la vía de ingreso al organismo (especialmente cuando estamos hablando de toxicología humana): inhalación, ingesta, a través de la piel.
- Según la naturaleza del contaminante: metales, contaminantes orgánicos persistentes, contaminantes emergentes, nanopartículas, microorganismos, etc.
- Según el factor ambiental contaminado (aire, agua, suelo, alimentos)

Tabla 5-1. Las cuatro grandes enfermedades ambientales de Japón

Enfermedad	Sustancia causante	Origen	Época
Minamata	Mercurio en peces	Descargas de una planta química	1932-1968
Niigata	Mercurio en peces	Descargas de una compañía eléctrica	1965-1968
Itai-Itai	Cadmio en arroz	Descargas de efluentes mineros	1910-1946
Asma de Yokkahichi	Dióxido de azufre	Emisiones de planta petroquímica	1960-1972

Nosotros nos centraremos en esta última clasificación, y hacia el final discutiremos en una sección aparte la contaminación microbiológica. Las vías de ingreso al organismo guardan correlato con los factores

ambientales involucrados: los tóxicos presentes en el aire se incorporan por inhalación, y en menor medida a través de la piel. Los tóxicos disueltos en el agua pueden incorporarse por ingestión, y en menor medida por exposición a través de la piel. Las sustancias de los suelos pueden incorporarse a los alimentos y ser después ingeridos; en menor medida, los niños pueden ingerir directamente tóxicos desde la tierra. Los alimentos, lógicamente, actúan a través de la ingesta. No discutiremos en este Capítulo otras formas de contaminación: radioactiva, sonora, lumínica, etc.

La Tabla 5-1 muestra las cuatro grandes enfermedades ambientales que asolaron a Japón. Una de ellas se debió a la inhalación de aire severamente contaminado; otras dos, por ingesta de peces contaminados con metales descargados al agua de río o mar; la cuarta, por ingesta de arroz contaminado con cadmio incorporado al suelo y al agua.

Tabla 5-2. Algunos casos notables de envenenamiento por contaminación de alimentos con plaguicidas

Lugar y fecha	Sustancia involucrada	Alimento	Nº de casos	Nº de muertes	Comentarios
Irak, 1971	Metilmercurio	Harina	6530	459	Semillas tratadas con fungicida. Ver Blesa y Castro 2015
Turquía, 1960-63	Hexaclorobenceno	Pan	3000	400	Semillas tratadas con fungicida
Irak, 1956	Alquil-mercurio	Harina	521	105	Semillas tratadas con fungicida. Ver Blesa y Castro 2015
India, 1958	Paratión	Trigo	360	102	Alimento contaminado en el almacenamiento
Colombia, 1967-68	Paratión	Harina	600	88	Alimento contaminado en el almacenamiento
EE.UU., 1985	Aldicarb	Sandía	1350	80	Alimento contaminado en el almacenamiento
Qatar, 1967-70	Endrín	Harina	691	24	Alimento contaminado en el almacenamiento
Ghana, 1967	Alquil-mercurio	Maíz	144	20	Semillas tratadas con fungicida
Guatemala, 1986-66	Alquil-mercurio	Pan	45	20	Semillas tratadas con fungicida
México, 1968	Paratión	Harina y azúcar	559	16	Alimento contaminado en el almacenamiento

5.4.2. Contaminación de alimentos

La contaminación química de alimentos ha sido causa de muchos episodios de envenenamientos masivos. En los casos de la Tabla 5-1, la contaminación era por metales, y el origen descargas industriales o mineras a los cursos de agua. Otro origen importante es la contaminación con sustancias agroquímicas. La Tabla 5-2, tomada del trabajo de Albert Palacios (1997) muestra los casos más resonantes del siglo XX.

Los casos más grave conocidos fueron el del envenenamiento por mercurio en Irak, que se describe en el Cuadro 5, y el del hexaclorobenceno de Turquía (ver Cuadro 6).

Cuadro 5-5

Intoxicación con fungicidas órganomercuriales en Iraq

Tomado de Blesa y Castro (2015)

En la década de 1950 se registró en Iraq un brote de envenenamiento por consumo de pan preparado con semillas de trigo tratadas con el fungicida ptouensulfanilamida de etilmercurio, con síntomas similares a los de intoxicación con metilmercurio: signos neurológicos y daño renal. Según Albert Palacios (1997) se registraron 105 fatalidades (ver Tabla 1). Este episodio fue un anticipo de un caso mucho más grave que sucedió a principios de 1970, y que resultó en cerca de 500 muertes (Bakir y col., 1973): 459 según Albert Palacios (Tabla 1).

Con la idea de usarlos para la siembra, en 1971 Iraq importó granos (trigo y cebada) que habían sido tratados con fungicidas organomercuriales. El trigo contenía, según mostraron análisis posteriores, metilmercurio, trazas de etilmercurio y algo de mercurio inorgánico. El fungicida de la cebada era una mezcla compleja que contenía metoxifenilmercurio, fenilmercurio y mercurio inorgánico, junto con trazas de metil y etilmercurio. Aun cuando los granos estaban coloreados para identificar la presencia del

fungicida, mucha gente destinó el trigo directamente a la producción de pan. Análisis posteriores demostraron que el pan contenía entre 5 y 10 mg de metilmercurio por kilogramo. La cebada se usó para alimentar animales (Skerfvingi y Copplestone, 1976).

Los intentos gubernamentales para retirar los granos de circulación fueron muy ineficaces, recuperándose sólo un 7% del total. Más de 6.000 personas se registraron para su atención en hospitales; el número de afectados fue seguramente mayor. Se registraron 452 muertes hospitalarias, a las que seguramente hay que sumar un número indeterminado de otras muertes (Skerfvingi y Copplestone, 1976).

Como ocurre frecuentemente, no faltó quien quisiera ver en esta tragedia un acto volitivo de Saddam Hussein, destinado a producir un genocidio en la población kurda. Dice Jane M. Hightower en su libro *Diagnosis: MERCURY. Money, politics & poison* (Island Press, 2009):

Could there also have been a motive of Saddam's for "purging" the enemy at that particular time?

(¿Pudo haber habido también un motivo para que Saddam "purgara" al enemigo en ese momento particular?)

La autora es una médica del área de San Francisco (California, EE.UU.) que se interesó por el problema de la intoxicación por mercurio como consecuencia del consumo de pescado. El libro apareció el mismo año que Barak Obama remplazaba a George W. Bush como Presidente de EE.UU. y bastante antes del final formal de la Guerra de Irak. Sobre ésta, un año después, en 2010, se darían a conocer los Registros de la Guerra de Iraq de Wikileaks, donde se señala que dicha guerra resultó en 109.000 muertes en Iraq. Sin duda, *Money, politics & poison*.

Cuadro 5-6

Intoxicación con hexaclorobenceno en Turquía

Entre 1955 y 1959 los habitantes de la región de Anatolia en Turquía consumieron pan fabricado con semillas de trigo que habían sido tratadas con hexaclorobenceno como fungicida. Un número elevado de personas consumieron entre 50 y 200 mg por día durante mucho tiempo, antes que se detectara el problema. La mayoría de los afectados fueron niños, y a lo largo de los años resultó en una tasa de mortalidad de 14%. Los efectos de la intoxicación en niños mayores de 4 años fue la enfermedad conocida como porfiria cutánea tarda, una variedad de la porfiria, enfermedad que afecta la capacidad de sintetizar hemoglobina. Los niños menores desarrollaron otra dolencia, que se conoció como dolencia rosa (pink sore), con elevadísimas tasas de mortalidad, del orden de 95%, Especialmente afectados fueron los lactantes, que ingerían el hexaclorobenceno con la leche materna. Las manifestaciones de la porfiria fueron evidentes aun después de 20 años (IARC 2001).

5.4.3. Contaminación del aire

Para la Organización Mundial de la Salud, la contaminación del aire es el mayor riesgo ambiental para la salud en 2019, ya que el 90% de las personas respira aire contaminado todos los días, y se estima que produce del orden de siete millones de muertes por año. Los contaminantes microscópicos en el

aire pueden llegar a los pulmones, el corazón y el cerebro a través de los sistemas respiratorios y circulatorios, causando cáncer, accidentes cerebrovasculares y enfermedades cardíacas y pulmonares. Alrededor de 90% de estas muertes se producen en países de ingresos bajos y medios, con altos volúmenes de emisiones de la industria, el transporte y la agricultura, pero también por artefactos hogareños y combustibles¹⁹.

19. Reporte Epidemiológico de Córdoba No 2.139, 18 de enero de 2019

La incorporación de sustancias tóxicas al aire se manifiesta más agudamente en los grandes centros urbanos, especialmente cuando la meteorología impide la disipación rápida de las sustancias liberadas. Dentro de éstas, podemos mencionar el nitrato de peroxiacetilo (PAN, ver Figura 14 en Capítulo 3), asociado al smog fotoquímico, el ozono troposférico, los óxidos de azufre y de nitrógeno responsables de la lluvia ácida, y en fin tóxicos agudos como monóxido de carbono y cianuro de hidrógeno. Estos temas han sido discutidos en el Capítulo 2.

El material particulado en suspensión es un contaminante importante por su posible impacto sobre las vías respiratorias. Por ese motivo, algunos países han comenzado a considerar la prohibición de los motores diésel, que queman diésel oil y generan cantidades mayores de partículas que los motores nafteros. Las partículas también pueden tener origen natural, como las erupciones volcánicas, o el impacto de meteoritos. Ambos temas ya han sido discutidos.

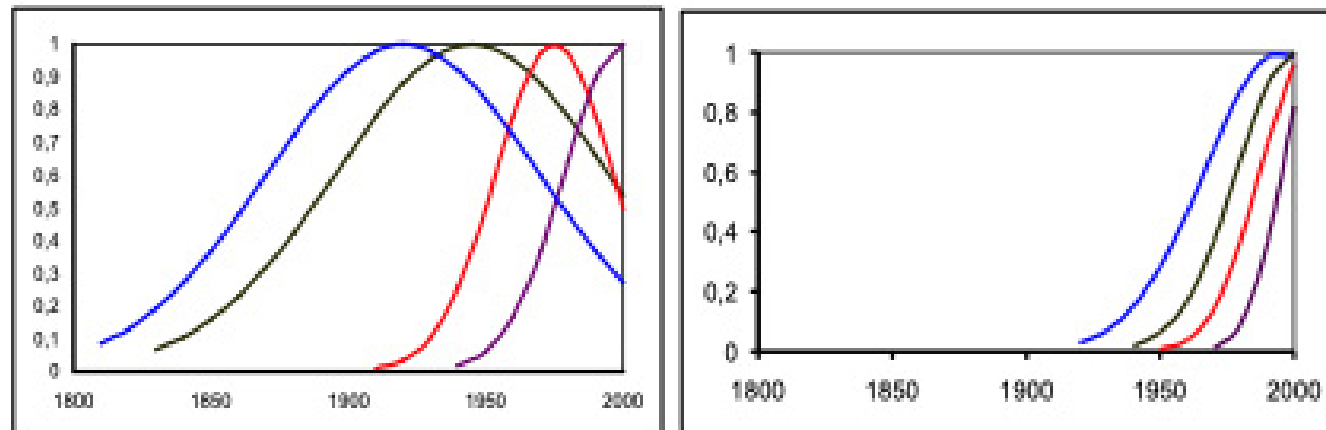
Una característica especial del aire surge de su estado gaseoso: Los contaminantes incorporados al aire por emisiones desde fuentes puntuales o difusas, se mueven en la atmósfera siguiendo leyes bien establecidas de los procesos de difusión y convección. Además, pueden sufrir transformaciones químicas, de forma que la concentración en cada punto y en cada instante depende del balance de estos procesos. El tema fue tratado en el Capítulo 2 (Sección 9)

5.4.4. Contaminación química del agua

En la segunda mitad del Siglo XX, existía una preocupación creciente por los efectos que podía tener la contaminación de las aguas originada por las innumerables sustancias químicas que el hombre sintetizaba para diferentes usos, y que no eran componentes naturales del ambiente (sustancias xenobióticas). Esa preocupación no opacaba sin embargo una visión relativamente optimista sobre el estado de las fuentes de agua para consumo humano en el mundo desarrollado. La Figura 5-4 muestra de manera muy esquemática cómo se creía que había ido

Figura 5-4

Esbozo de la gravedad de la contaminación biológica (trazo azul), de la contaminación por metales y metaloides (trazo verde), de la contaminación por agroquímicos (trazo rojo) y de la contaminación por sustancias xenobióticas que pueden afectar la biota aun a nivel de trazas: A la izquierda, mundo desarrollado; a la derecha, mundo en desarrollo. Tomado de M.A. Blesa, Introducción, Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea, Editores M.A. Blesa y B. Sánchez, Editorial CIEMAT (2004). ISBN: 84-7834-489-6



evolucionando la gravedad de los problemas no resueltos de contaminación del agua. La misma refleja la aparición sucesiva de distintas formas de contaminación (biológica, por metales y metaloides, por nutrientes y por sustancias xenobióticas como agroquímicos, detergentes, antibióticos, etc.), y los resultados de los esfuerzos del hombre por resolverlos. La contaminación biológica apareció con importancia desde los albores de la revolución industrial, aunque en realidad fue un problema serio desde los comienzos de la civilización, en la medida en que existieron ciudades apiñadas y sin infraestructura de saneamiento. El desarrollo de la ingeniería sanitaria durante el siglo XIX estableció los procedimientos básicos para el tratamiento de agua para consumo humano: clarificación, filtración y desinfección.

La contaminación por metales también reconoce una larga historia. Los restos óseos de antiguos romanos contienen cantidades de plomo por encima de los valores sugeridos como seguros actualmente por la

Organización Mundial de la Salud. Incluso se ha postulado que la locura, esterilidad y otras enfermedades eran la frecuente consecuencia del envenenamiento por plomo en las clases altas romanas. El plomo provenía del uso de acetato de plomo como edulcorante en bebidas, y del uso de cañerías de ese metal para la provisión de agua. A lo largo de la historia, han ocurrido muchos otros acontecimientos extremos; el caso de los derrames vinculados con la explotación minera puede consultarse en la página web de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (Blesa 2010).

Vale destacar también la intoxicación masiva con mercurio en la bahía de Minamata, en la Prefectura Kumamoto, Japón detectada en 1956, pero fruto de una contaminación de larga data. Este tema se trata en el Cuadro 7.

Cuadro 5-7**La enfermedad de Minamata**

La enfermedad de Minamata es una encefalopatía y neuropatía periférica causada por la ingesta diaria de pescados y mariscos contaminados con metilmercurio. Los peces, camarones, cangrejos y mariscos en general incorporan el metilmercurio a través de las agallas y del tracto gastrointestinal. El brote de la enfermedad de Minamata ocurrió en el área costera del mar de Yatsushiro, especialmente en la bahía de Minamata en la Prefectura de Kumamoto. Otro brote ocurrió después en la Prefectura de Niigata.

Durante muchos años, la planta de producción de acetaldehído de la compañía Chisso descargó al mar sus efluentes, los que contenían metilmercurio (usado como catalizador del proceso). La Figura 5 muestra un esquema de la planta, tomado de los *Minamata Disease Archives* (<http://nimd.env.go.jp/archives/english/index.html>). La descarga comenzó en la década de 1930, pero los efectos clínicos fueron observados mucho más tarde, a partir de 1956 y recién en 1959 pudo establecerse una relación causal con los niveles de mercurio en el agua de la bahía.

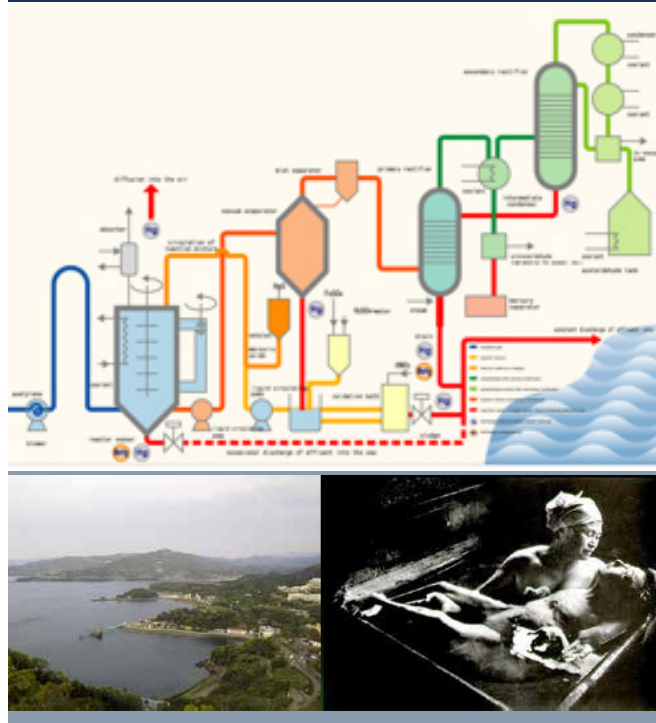
Como ocurrió con la industria del tabaco, los resultados de los estudios conducidos por la propia compañía fueron ocultados y abortados.

El brote de la prefectura de Niigata ocurrió hacia 1965, y tuvo su origen en efluentes de otra planta similar a la de Chisso.

Hasta 2001, se reportaron oficialmente 2.265 víctimas, con 1.784 muertes (*Ministry of Environment of Japan, Minamata Disease. History and Measures*. <http://www.env.go.jp/en/chemi/hs/minamata2002/index.html>). Hacia 2006, se reconocía del orden de 3.700 personas afectadas, en condiciones de entablar juicio.

Figura 5-5

Arriba, flowsheet de la planta de Chisso; abajo, a la izquierda, vista de la bahía de Minamata; a la derecha, un caso de la enfermedad.



La contaminación por nutrientes suele tener como consecuencia la eutrofización de cuerpos de agua que reciben efluentes no tratados, ricos en nitratos y/o fosfatos, u otros nutrientes. La Comunidad Europea reconoció en 1992, a través de una Directiva tendiente a fijar límites y establecer buenas prácticas agrícolas, que el nitrato era el principal contaminante de origen difuso de las aguas de la Comunidad, responsable de problemas de eutrofización (CCE 1991). Ya se describió en el Cuadro 4 el tema de las floraciones algales causadas por la eutrofización. El problema de las floraciones en aguas dulces se centra en las cianobacterias, responsables por las floraciones verdezudas; estas floraciones requieren especialmente de niveles elevados de fósforo. Además

de conferir propiedades organolépticas desagradables al agua, estas bacterias pueden producir cianotoxinas, capaces de producir la muerte de muchas especies acuáticas. Una de los grupos de cianotoxinas más usual es el de las microcistinas. Este tipo de floraciones ha sido observado, por ejemplo, en el dique de Itaipú, en la frontera entre Brasil y Paraguay (Maniglia y col. 2010).

En las aguas para consumo humano, se ha vinculado históricamente la presencia de niveles altos de nitrato con el "síndrome del bebé azul" o metahemoglobinemia, un síndrome que afecta especialmente a bebés de 6 meses o menos, y vinculado con la conversión de la hemoglobina en metahemoglobina (EPA 2014). Esta última contiene hierro oxidado (Fe^{3+}) en lugar de Fe^{2+} , y es incapaz de transportar oxígeno.

La contaminación por compuestos químicos orgánicos sintetizados por el hombre incluye un amplio espectro de sustancias. La atención se ha centrado especialmente en los contaminantes orgánicos persistentes (COPs), sustancias que presentan una alta estabilidad en el ambiente frente a cualquier posible mecanismo de degradación. Muchas de estas sustancias tienen efectos mutagénicos y cancerígenos. La atención se ha enfocado especialmente en la docena sucia, una docena de compuestos considerados especialmente peligrosos por la Organización para el Desarrollo Industrial de las Naciones Unidas (UNIDO), discutidos en el Capítulo 3. También se presta atención a la contaminación por fármacos (antibióticos, etc.), detergentes y otras sustancias sintetizadas por el hombre.

5.4.1. Contaminación de suelos

En ambientes rurales, la principal fuente de contaminación de los suelos son las sustancias agroquímicas: fertilizantes, insecticidas, fungicidas, exfoliantes, etc. Estas sustancias pueden volatilizarse e incorporarse al aire, pueden contaminar aguas superficiales y acuíferos subterráneos y pueden incorporarse a los vegetales y frutas, con riesgo de salud en su consumo.

La contaminación severa del suelo suele estar asociada ya sea a prácticas industriales y/o a la descarga descontrolada de residuos industriales y urbanos. El alto porcentaje de población en ambientes urbanos hace especialmente importante la posibilidad de asentamientos en sitios contaminados. Un tema de particular importancia en gestión ambiental es el posible uso de sitios contaminados (por actividades industriales previas, o usados para descarga de residuos urbanos) como asentamiento de población. En general, la contaminación de suelos urbanos está fuertemente asociada con la contaminación de cursos de agua adyacentes, que son usados para la descarga descontrolada de residuos urbanos e industriales. Es posible encontrar en Internet páginas que describen "los diez sitios más contaminados del planeta", o cosas similares, sin mucha base científica. Esos listados sirven sin embargo para tomar nota de serios problemas ambientales que requieren soluciones. En esos listados suele aparecer la cuenca Matanza Riachuelo, que comparte una característica usual con muchos de esos sitios: la adyacencia a cursos de agua que son usados para el volcado de residuos y que actúan transportando los contaminantes no solo a sus propios sedimentos, sino también a las zonas ribereñas. En la Argentina, hay serios problemas también en otras cuencas, en especial la del río Reconquista en la Provincia de Buenos Aires, y la del río Salí, en Tucumán y Santiago del Estero y, en zonas menos contaminadas, en las provincias de Catamarca, Córdoba y Salta. Cada una de estas cuencas tiene un Comité de Cuenca que entiende en su gestión: el ACUMAR, el COMIREC y el Comité de Cuenca Salí Dulce. El COMIREC depende del Gobierno de la provincia de Buenos Aires, y los otros recogen el carácter interjurisdiccional de las cuencas. Para mayor información sobre estos comités, se puede consultar sus páginas web: [www.acumar.gov.ar](#), [www.comirec.gov.ar](#) y [www.comitecuenca.com.ar](#).

También se ha constituido una Red Latinoamericana de Sitios Contaminados (ReLaSC), cuya página web puede consultarse en: [www.rela-sc.org](#)

En los cuadros que siguen describimos dos casos que atrajeron mucha atención, uno a nivel internacional, y otro en Argentina: Love Canal en EE.UU. y Abra Pampa en la provincia de Jujuy.

Cuadro 5-8

El caso de Love Canal

A fines del siglo XIX, William T. Love se propuso construir un canal que uniera el río Niagara con el lago Ontario en EE.UU. Así se originó el Love Canal, proyecto que abortó después de haberse excavado unos 1,5 km con una profundidad de algunos metros y un ancho de 15 metros. En la década de 1940 los terrenos eran propiedad de la Hooker Chemical Company que drenó el canal y lo usó, con autorización oficial, para enterrar tambores de sustancias tóxicas. Ya en la década de 1950 Love Canal era la designación de un barrio de viviendas económicas adyacentes al canal, y la Hooker Chemical Company se deshizo del sumidero de desechos cediéndoselo al Distrito Escolar de Niagara Falls, ciudad en la cual estaban el barrio y el canal. En la cesión se estipuló que existían desechos tóxicos que comprometían posibles usos del terreno y que la compañía deslindaba toda responsabilidad que pudiera derivarse de esos usos. Sobre el canal relleno y con miles de toneladas de compuestos químicos peligrosos enterradas en él, se construyó una escuela primaria.

A fines de la década de 1970 una investigación periodística y movilizaciones sociales pusieron en evidencia signos epidemiológicos de enfermedades diversas en los residentes del barrio, incluyendo abortos y malformaciones fetales. La interpretación posterior fue que lluvias inusuales habían hecho subir el nivel de las aguas subterráneas, corroyendo los tambores y liberando las sustancias tóxicas. Durante la presidencia de James Carter se reubicaron del orden de 900 familias, con un costo del orden de 17 millones de dólares (State University of New York SUNY Geneseo History Department, 2013).

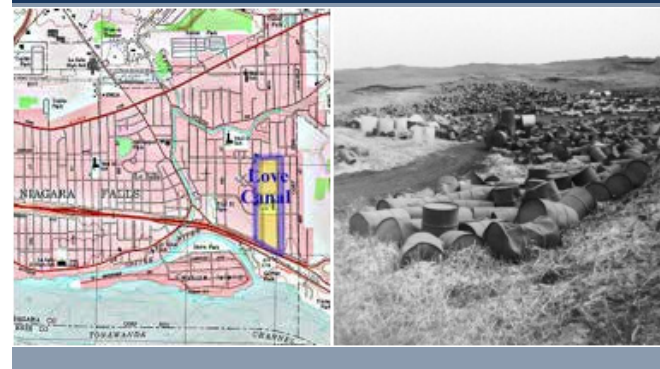
Estos hechos tuvieron profundas consecuencias en la gestión ambiental, desde el activismo de muchos grupos ambientalistas, hasta la sanción en 1980 de la ley Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA) que es habitualmente conocida como Superfund. Este

instrumento sienta las pautas para gestionar sitios contaminados en EE.UU. La United States Environmental Protection Agency (USEPA) publica en 2013 un listado de 1165 sitios incluidos en la National Priority List de sitios que requieren atención en el marco de ley Superfund (USEPA 2013).

La Boston University School of Public Health (2003) publicó una página web con mucha información sobre el tema, incluyendo un artículo de la prestigiosa revista Environmental Science and Technology. Las dos imágenes de arriba fueron tomadas del abundante material de esa página.

Figura 5-6

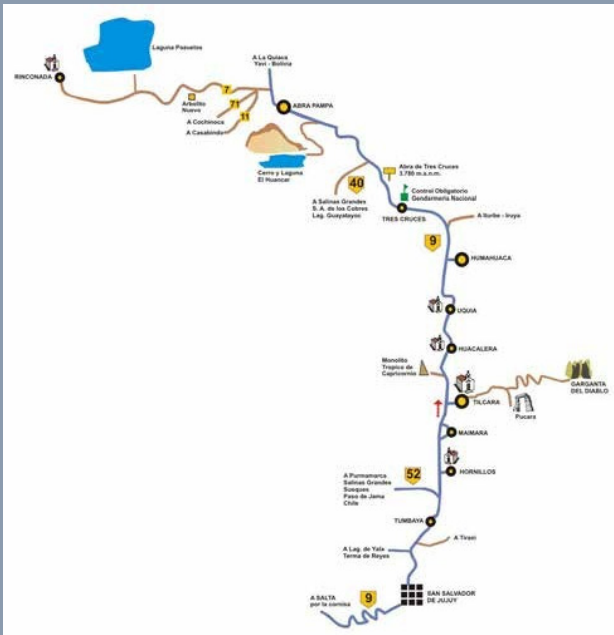
A la izquierda, mapa de Love Canal en la ciudad de Niagara Falls, New York, EE.UU. A la derecha, imágenes de los barriles con sustancias tóxicas. Tomado de <http://www.bu.edu/lovecanal/main2.html>.



Cuadro 5-9

El caso de Abra Pampa

Figura 5-7. Ubicación de Abra Pampa en la Quebrada de Humahuaca



Abra Pampa es una localidad de la Quebrada de Humahuaca en la provincia de Jujuy, Argentina (ver mapa). Allí funcionó la Fundición Metal Huasi que procesó grandes cantidades de minerales. La escoria resultante de muchos años quedó incluida en la ciudad, constituyéndose en parte de paisaje urbano. La Figura 8 muestra el montículo de unos 10 m de altura, constituido esencialmente por escoria de minerales con plomo, ubicado muy cerca de la ruta y de la plaza. Ese material fue usado como relleno en terrenos sobre los cuales se construyeron viviendas. La instalación fabril cerró a fines de la década de 1980, pero los riesgos para la salud de la población – especialmente de los niños – no fueron advertidos hasta el siglo XXI.

Figura 5-8.

A la izquierda, montículo de escoria de minerales en Abra Pampa. A la derecha, terrenos rellenados con esa escoria en uno de los barrios de Abra Pampa (Tomado de Castro Mariscal y col. 2010).



Un estudio realizado en 2006 (Castro Mariscal y col. 2010) mostró que el agua en Abra Pampa contenía entre 50 y 80 $\mu\text{g}/\text{L}$ de plomo, mientras que la OMS sugiere 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ como límite provisional. Los niveles en sangre indicaron que el 28% de los 237 niños estudiados contenía más de 10 μg de plomo por decilitro. La exposición al plomo se asocia con una serie de dolencias que incluyen efectos sobre el desarrollo neurológico, enfermedades cardiovasculares, daños en la función renal, hipertensión, y efectos adversos sobre la fertilidad y el embarazo. No se ha establecido ningún valor umbral por debajo del cual el plomo no sea tóxico, y los niveles detectados en Abra Pampa ya son preocupantes sobre la base de información disponible, especialmente para el desarrollo neurológico de niños (WHO, 2009).

Se conocen casos más graves de intoxicación por plomo. En momentos de escribir estas líneas (mayo de 2015) fue título de los diarios la muerte de 28 niños en Nigeria a causa de intoxicación con plomo. Este plomo proviene de rocas destinadas a la extracción informal del oro, que eran trasladadas al ejido urbano. Según las fuentes periodísticas, el plomo contaminó suelo y agua de una amplia región y provocó las muertes señaladas y muchas otras informadas por Médicos sin Fronteras.

5.5. Contaminación microbiológica

Esta sección toma material del artículo de Paulino y colaboradores (2010).

5.5.1. Generalidades

Una de las formas más graves de contaminación para el hombre es la relacionada con organismos patógenos, responsables de epidemias, endemias y brotes, algunos muy severos. Por ese motivo, el primer punto a tratar en el estudio de la contaminación ambiental es el tema de disponibilidad de agua potable de red y de cloacas.

Cuadro 5-10

Endemias, epidemias y pandemias. El caso del cólera

El Diccionario de la Real Academia Española define endemia como enfermedad que reina habitualmente, o en épocas fijas, en un país o comarca. En cambio, epidemia es enfermedad que se propaga durante algún tiempo por un país, acometiendo simultáneamente a gran número de personas, y pandemia es enfermedad epidémica que se extiende a muchos países o que ataca a casi todos los individuos de una localidad o región. La Organización Mundial de la Salud omite la segunda alternativa de esta última definición en su descripción de una pandemia: *An epidemic occurring worldwide or over a very wide area, crossing boundaries of several countries, and usually affecting a large number of people.* Ver: http://www.who.int/csr/resources/publications/WHO_CDS_EPR_2007_6c.pdf?ua=1

A diferencia de las endemias, las epidemias y pandemias son necesariamente enfermedades infecciosas, habitualmente causadas por un microorganismo patógeno. Las endemias más comunes también son enfermedades infecciosas, pero las puede haber de otro origen, como fue por ejemplo el caso del bocio endémico en el noroeste argentino, causado por falta de yodo. El HACRE (ver Cuadro 5.2) es otro ejemplo.

Nos interesa aquí consignar brevemente los modelos matemáticos que se usan para describir la evolución de una epidemia o una pandemia. El modelo matemático más sencillo identifica una población total de N individuos, cada uno de los cuales puede pertenecer a uno de los siguientes grupos: el de los individuos sanos, pero susceptibles de contraer la enfermedad (S); el de los individuos enfermos (infectados, I), y el de los individuos que sufrieron la enfermedad, se recuperaron y adquirieron inmunidad (R). Lo que describe el modelo es cómo evolucionan los números S , I y R con el tiempo. Para ello se suponen dos ecuaciones básicas:

1. La tasa de infección de los individuos sanos depende del contacto de un individuo sano con uno infectado. Esta suposición se escribe en forma de una ecuación diferencial:

$$dS / dt = -\beta IS / N$$

Esta ecuación muestra que el número de individuos sanos va disminuyendo con el tiempo, y la tasa con que ello ocurre está descrita por la constante β . Esta constante mide pues cuán contagiosa es la enfermedad.

2. A su vez, los individuos infectados pasan a ser individuos recuperados, cumpliendo con la siguiente ecuación.

$$dR / dt = \gamma I$$

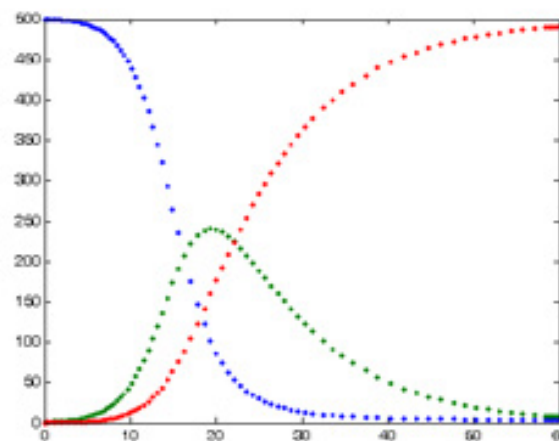
La constante γ mide la velocidad de recuperación de los individuos enfermos. Está claro que si β es grande y γ es pequeño, rápidamente aumentará mucho el número de individuos infectados. La variación temporal de este número está dada por la siguiente ecuación, que es el balance entre las dos escritas arriba:

$$dI / dt = (\beta IS / N) - \gamma I$$

Este modelo extremadamente sencillo conduce al gráfico de la Figura 5-9 que muestra la evolución de S , I y R para el caso hipotético que al fin de la epidemia todos los individuos han adquirido inmunidad. (Recordar de $S + I + R = N$).

Figura 5-9.

Evolución en el tiempo del S (azul), I (verde) y R (rojo) según las ecuaciones del texto, para un cierto valor del cociente β/γ .



Lógicamente, la evolución real de una epidemia es mucho más compleja.

Nota agregada durante la edición de este libro:

La pandemia de COVID-19, en curso en los primeros meses de 2020 ha hecho popular la difusión de dos números:

1. El tiempo requerido para que el número de infectados se duplique. Este número tiene sentido en

las etapas iniciales de la pandemia. Como se ve en la Figura 5-9, al comienzo, el número de infectados aumenta en forma aproximadamente exponencial, y la discusión presentada sobre dinámica poblacional es adecuada (ver Capítulo 4 Sección 1). Ese tiempo es simplemente igual a $0,693/\beta$.

2. El número de personas que, en promedio, contagia cada infectado (el llamado R_0), a lo largo del período de contagio Δt . Ese número es simplemente igual a $R_0 = \beta \Delta t$.

Las pandemias de cólera

En los últimos doscientos años se registraron siete pandemias de cólera; la historia previa de la enfermedad es tema de debate entre los historiadores médicos (Kaper y col 1995). La Tabla que se presenta a continuación muestra las fechas de esas pandemias, (Kaper y col 1995). Se ha indicado la actualidad como fecha de último registro de la séptima pandemia, pero en realidad todos los brotes posteriores a 1975, incluidos los que afectaron a Sudamérica y a Haití pueden ser fenómenos independientes, o incluso formar parte de una octava pandemia. Según la OMS, se estima que en el mundo se producen entre 1,3 y 4 millones de casos y entre 21 000 y 143 000 de defunciones.

Tabla 5-3. Pandemias de Cólera.

Pandemia N°	Fechas
1	1817-1823
2	1829-1851
3	1852-1859
4	1863-1879
5	1881-1896
6	1899-1923
7	1961-2014

Estas pandemias ilustran los graduales avances de la humanidad en la comprensión del origen de la

enfermedad, en la provisión de agua segura, y en el desarrollo de antibióticos adecuados para combatir al *Vibrio cholerae*, bacteria que produce la enfermedad. Ahora se sabe que la enfermedad se transmite por consumo de agua contaminada con materia fecal de individuos enfermos. Los peces crudos también la pueden transmitir. Sin embargo, originariamente fue atribuida a los miasmas o los humores (bilis). Fue durante la segunda pandemia que John Snow pudo demostrar en Londres, usando criterios epidemiológicos, que la enfermedad era causada por agua contaminada; ello eventualmente derivó en el tratamiento del agua de consumo humano como modo crucial de prevención de las epidemias de cólera. Más o menos simultáneamente, también en Gran Bretaña, se propuso por primera vez la terapia de rehidratación que es hoy la herramienta más importante para el tratamiento del cólera. Diez años después Pasteur proponía su teoría de los gérmenes, y en 1884 Koch aislaba el bacilo del cólera. La cuarta pandemia llegó al Cono Sur en ocasión de la guerra de la Triple Alianza y diezmo los ejércitos de Paraguay, Argentina, Brasil y Uruguay.

En nuestra región latinoamericana es especialmente importante y de mucha actualidad el cólera. Baste mencionar que en la segunda mitad de 2014 en Haití se registraron alrededor de 918 casos semanales. Ello demuestra que la epidemia desatada en 2010 está lejos de ser dominada. En total, se registraron 717.203 casos desde el comienzo de la epidemia. Cabe recordar que la epidemia comenzó unos meses después del devastador terremoto de enero de 2010 y según algunas fuentes se originó por la participación de personal nepalés en las fuerzas enviadas por la ONU para enfrentar la situación creada por el terremoto. En esos momentos, Nepal sufría de una epidemia de cólera.

No es de extrañar que el cólera haya sido protagonista principal de obras de arte tan notables como la novela *El amor en los tiempos del cólera* de Gabriel García Márquez, y el filme *Muerte en Venecia*, adaptación de Luchino Visconti de la novela homónima de Thomas Mann.

Figura 5-10

A la izquierda, el cólera en Haití. Tomada de las imágenes publicadas por la revista *Time*, *Scenes from Haiti's Cholera Outbreak*. Ver: . A la derecha imagen del *Vibrio cholerae*. Tomada del Ministerio del poder Popular para Salud de Venezuela. Ver:



Figura 5-11

A la izquierda, imagen del filme *Muerte en Venecia*. Ver: . A la derecha, portada del libro de García Márquez.



Dado que la contaminación microbiológica afecta principalmente al agua y a los alimentos de consumo humano, trataremos centralmente el tema de la contaminación biológica del agua. Cabe señalar sin embargo que la contaminación del agua puede conducir a la transmisión a través del aire, cuando el agente patógeno acompaña a agua que se incorpora al aire como aerosoles. El caso más conocido es el de la enfermedad llamada legionelosis, causada por la bacteria *Legionella pneumophila* y que puede causar

neumonías potencialmente fatales.

El Código Alimentario Argentino (CAA) y sus modificaciones del artículo 982 de la ley 18.284 (2007), la Organización Mundial de la Salud (OMS) en sus Guías para la calidad del agua potable y otras normas internacionales, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el Consejo Federal de Entidades Sanitarias (COF) establecen o recomiendan requisitos de calidad para el agua de consumo humano. En general, la normativa establece que el agua es apta bacteriológicamente para consumo si se encuentra exenta de microorganismos patógenos de origen entérico y parasitario intestinal.

La presencia de microorganismos patógenos en el agua de bebida es un riesgo que se incrementa en las áreas marginales de mayor densidad poblacional o en zonas sin disponibilidad de agua de red. La seguridad de que un agua contaminada puede ser causal de enfermedades, ha conducido a la necesidad de controlar rutinariamente la calidad microbiológica de muestras de diversos orígenes.

Los controles rutinarios de la totalidad de los microorganismos hídricos, potencialmente riesgosos para la salud, resultan difíciles de llevar a cabo debido a la gran variedad de bacterias patógenas cultivables, a la complejidad de los ensayos de aislamiento y a la presencia en baja concentración de varias especies altamente agresivas, sin que el orden detallado indique prioridad. Por esta razón, los análisis bacteriológicos apuntan a la búsqueda de microorganismos indicadores de contaminación fecal y se centralizan en la cuantificación de coliformes. Este grupo está integrado por enterobacterias, y *Escherichia coli* es el indicador universal de contaminación fecal.

La contaminación biológica de aguas es causada básicamente por la presencia de excrementos humanos o de origen animal, y está habitualmente asociada a la rápida urbanización y la falta de tratamiento de las aguas servidas.

En las aguas con contaminación biológica, ricas en materia orgánica de origen doméstico, proliferan organismos patógenos con capacidad de causar distintas afecciones, incluyendo alergias, diarrea, tífus, cólera, entre otras. También son importantes otros organismos (oportunistas) que, aunque no se los clasifica como patógenos, potencialmente pueden producir enfermedades en personas con los sistemas de defensa reducidos.

5.5.2. Organismos responsables y enfermedades de transmisión hídrica

La Tabla 5-4 muestra los principales organismos patógenos clásicos transmitidos a través del agua. La Tabla 5-5 muestra las enfermedades resultantes de los patógenos presentes en el agua. Muchas veces es difícil distinguir entre enfermedades causadas por el consumo de agua contaminada y las ocasionadas por condiciones deficientes de higiene, como falta de cloacas, pozos ciegos próximos, etc. Sin embargo, la causa subyacente es siempre la misma: la presencia de microorganismos patógenos en medios acuosos que ingresan al organismo ya sea por ingesta directa, o a través de manos contaminadas, etc.

Tabla 5-4. Patógenos clásicos más frecuentes asociados con la contaminación del agua

Tipo de organismo	Organismo	Incidencia sanitaria	Observaciones
Bacterias	<i>E. coli</i> patógenos	Alta	
	<i>Salmonella typhi</i>	Alta	
	Otras salmonelas	Alta	
	<i>Shigella spp.</i>	Alta	
	<i>Vibrio Cholerae</i>	Alta	
	<i>Yersinia enterocolítica</i>	Alta	
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Media	Es más frecuente la transmisión por alimentos
	Otras pseudomonas	Media	Es más frecuente la transmisión por alimentos
Virus	Poliovirus	Alta	
	Virus de hepatitis A	Alta	
	Enterovirus	Alta	Es más frecuente la transmisión por alimentos
	Rotavirus	Alta	Es más frecuente la transmisión por alimentos
	Coronavirus	Alta	No se transmite por agua, pero su detección en aguas residuales es una herramienta de diagnóstico epidemiológico
Protozoos	<i>Entamoeba histolytica</i>	Alta	Es más frecuente la transmisión por alimentos
	<i>Giardia ssp.</i>	Alta	Es más frecuente la transmisión por alimentos
	<i>Cryptosporidium ssp.</i>	Alta	Es más frecuente la transmisión por alimentos

Tabla 5-5. Enfermedades más frecuentes asociados con la contaminación biológica del agua

VIRÓSICAS	BACTERIANAS	PROTOZOOS Y GUSANOS
Hepatitis A y B	Cólera	Giardiasis
Poliomielitis	Fiebre tifoidea	Amebiasis
Gastroenteritis por rotavirus	Paratifoidea	Ascariasis
	Shigelosis	
	Diarreas por E.coli	

5.5.3. Análisis microbiológico del agua

El diagnóstico de la contaminación biológica se hace mediante el análisis microbiológico del agua. Los métodos más comúnmente usados se basan en la determinación de unidades formadoras de colonias o el número más probable. La medición de turbidez, que no distingue entre bacterias vivas y bacterias muertas, es útil por su simplicidad en cierto tipo de usos. Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas, los mismos se describen resumidamente en el Cuadro 11.

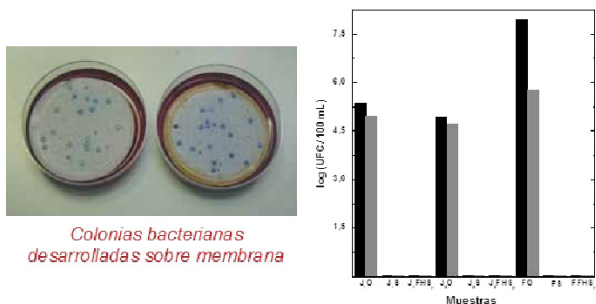
Cuadro 5-11

Técnicas de evaluación de la calidad microbiológica de aguas

1. Determinación de las unidades formadoras de colonias (UCF). El recuento de microorganismos cultivables se puede llevar a cabo por siembra directa en un medio de cultivo selectivo sólido de un volumen de muestra de agua, o previa concentración de la misma por filtración a través de membranas de ésteres de celulosa, denominada Técnica de la Membrana Filtrante. En ambos casos, cada célula viable crece (en el medio o sobre la membrana) y genera una colonia contable (UFC). El número de UFC contables debe estar comprendido entre 30 y 100, y el límite de detección es < 102 UFC / mL. La Figura 12 muestra el aspecto típico de un cultivo donde las colonias se desarrollaron sobre una membrana y los resultados de los análisis microbiológicos realizados para la validación de metodologías de desinfección solar desarrollados por uno de los autores.

Figura 5-12

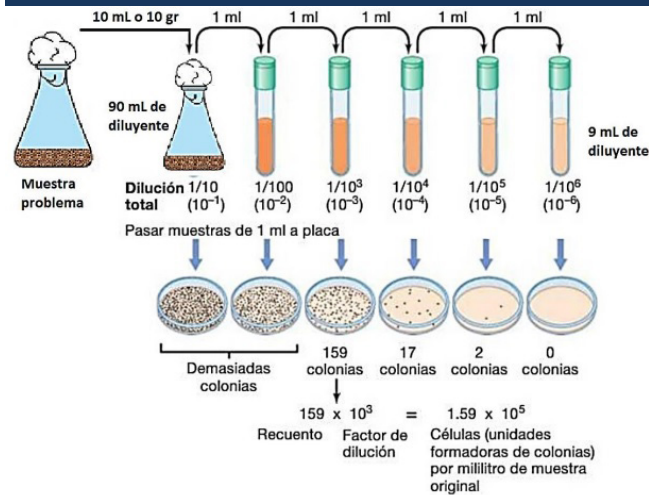
Recuento de unidades formadoras de colonias. Número de coliformes totales (negro) y fecales (gris) en muestras de agua de pozos de las familias Juárez (J1 y J2) y Flores (F) de Los Pereyra, Tucumán sin tratamiento (O), y tratadas por SODIS (S) y por FHS con TiO₂ soportado a la pared de las botellas (FHSp). Tiempo de tratamiento: 4 h. Intensidad máxima de radiación: 55-65 W m⁻².



2. Método del número más probable (MNP). La densidad microbiana probable en una muestra de agua con baja carga se puede determinar mediante la Técnica de Fermentación con Tubos Múltiples (Método de Wilson) y los resultados se expresan como NMP de microorganismos existentes. Se siembran alícuotas de diluciones seriadas de la muestra en medios de cultivos líquidos específicos y, al cabo de una incubación adecuada, se consideran los números de cultivos "positivos" y negativos". El NMP se calcula por fórmulas o por tablas que utilizan el número de tubos positivos en las diluciones. La Figura 13 ilustra el procedimiento.

Figura 5-13.

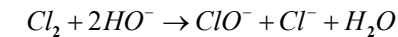
Método del número más probable



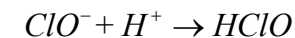
3. Medición de turbidez. En ausencia de material particulado inorgánico, la turbidez da una medida de la cantidad de bacterias totales presentes, vivas o muertas. No se usa para caracterizar la calidad microbiológica del agua, pero, por su simplicidad, es útil para medir la evolución de las bacterias durante su etapa de crecimiento.

5.5.4. Desinfección

La forma más usual de tratamiento de aguas para prevenir la contaminación biológica en el agua para consumo humano recurre a la cloración, método eficiente y económico para tratar agua distribuida por redes. En aguas alcalinas, el cloro, que es un gas moderadamente soluble en agua²⁰, se transforma mediante una reacción química conocida como dismutación en una mezcla de cloruro e hipoclorito:



En aguas de pH entre 5 y 9, esta reacción ocurre parcialmente, y se encuentra en solución tanto cloro molecular como la mezcla cloruro/hipoclorito. El poder oxidante, que es la base del poder desinfectante del cloro, permanece adecuadamente alto. Además, el hipoclorito manifiesta su afinidad por el protón y forma ácido hipocloroso:



El ácido hipocloroso es un excelente agente desinfectante: puede atravesar con facilidad las paredes de las bacterias (habitualmente las mismas tienen carga negativa y repelen a los iones ClO⁻), y en su interior libera radicales oxigenados altamente oxidantes.

El mayor inconveniente en el uso de cloro es la generación de sustancias cloradas, los subproductos de la desinfección: si el agua contiene contaminantes orgánicos, el cloro puede atacarlos, formando compuestos organoclorados. Uno de estos productos, tal vez el más estudiado, es el cloroformo, HCCl₃. La preocupación por la toxicidad de esta sustancia ha llevado a sugerir o requerir límites máximos en agua que va desde 80 hasta 200 mg/L. En general, el propio proceso de potabilización remueve el grueso de la materia orgánica, y los niveles de subproductos de desinfección

20. La solubilidad es de 3 L de gas por litro de agua. Esa solubilidad equivale a una concentración de 0,13 moles/L, o unos 10 g/L.

son adecuados. Sin embargo, cabe recordar el episodio del 3 de septiembre de 2003, cuando Aguas Argentinas, antecesora de AySA interrumpió el suministro de agua para la ciudad de Buenos Aires porque debió detener la planta potabilizadora General San Martín; esta medida obedeció a la detección en el agua de alimentación de la planta de "una sustancia orgánica que impedía hacer el proceso de potabilización". La sustancia detectada era aparentemente un fenol, con cierto grado de toxicidad de por sí, y que genera clorofenoles por cloración, de toxicidad mayor. Los niveles guía para fenol (C_6H_5OH) y para 2,4-diclorofenol ($C_6H_3Cl_2OH$) son 2 y 0,3 $\mu g/L$, respectivamente. La mala calidad del agua de alimentación al proceso de potabilización encarece fuertemente este proceso, si el mismo mantiene su eficiencia.

Como alternativas a la cloración, se puede desinfectar aguas usando ozono, o por irradiación con luz ultravioleta. Se evita así la generación de compuestos organoclorados, pero el costo del proceso es mayor, y no queda ningún poder residual de desinfección en las aguas tratadas.

Cuadro 5-12

Desinfección fotoquímica con lámparas: La facilidad Catskill/Delaware de desinfección ultravioleta para la ciudad de Nueva York

Desinfectar agua para consumo humano usando radiación UV-C requiere resolver y comprender una serie de temas de biología y de ingeniería. Entre los primeros, cabe mencionar que la viabilidad de usar esta técnica en gran escala se validó recién cuando pudo demostrarse que el *Cryptosporidium* no era inmune a la radiación. Entre los temas de ingeniería, no es menor la validación de la dosis de irradiación recibida por todos los elementos de volumen del agua que circula alrededor de la lámpara.

La ciudad de Nueva York ha construido una facilidad muy grande para desinfectar el agua por radiación ultravioleta provista por 10.000 lámparas de mercurio de baja presión, similares a los tubos fluorescentes comunes, pero construidos en cuarzo y sin el

recubrimiento del fósforo, para permitir la emisión de radiación UV. La escala del proyecto supera en un orden de magnitud todos los ejemplos previos. En operación plena, la Catskill and Delaware Ultraviolet Light Disinfection Facility de Mount Pleasant, N.Y., puede tratar 8.000 millones de litros de agua de las potabilizadoras de Catskill y Delaware, que proveen más del 90% del agua potable de la ciudad de Nueva York. El costo de la planta es del orden de 2.000 millones de dólares estadounidenses. En operación, el mantenimiento de rutina requiere el reemplazo de unas 14 lámparas por día, tasa que se calcula suponiendo una vida útil de cada lámpara de dos años. Cada lámpara contiene unos 150 mg de mercurio, lo que arroja un inventario total de 1,5 kg en las lámparas en operación, y se descartarán con las lámparas usadas alrededor de 2 gramos de mercurio por día. El informe de impacto ambiental analiza en detalle las posibles consecuencias de rotura de lámparas. Fue inaugurada el 8 de octubre de 2013. Ver: <http://www.nyc.gov/html/dep/pdf/catdel/4-13hazmat.pdf>.

Figura 5-14

Vista de la facilidad de desinfección UV de Catskill/Delaware.

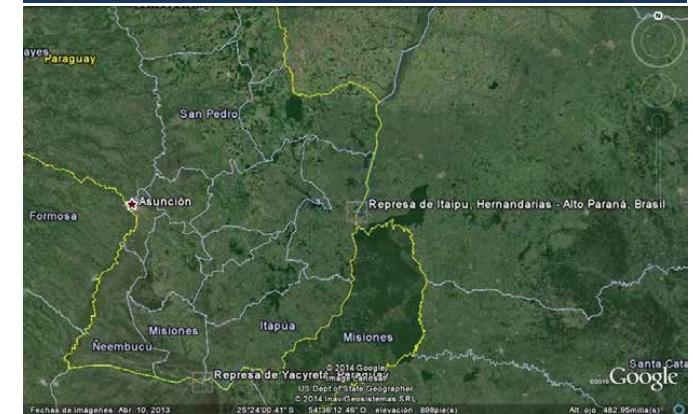


La contaminación por bacterias y virus no es el único problema. Vale la pena mencionar la esquistosomiasis (o esquistosomiasis), enfermedad causada por un gusano cuyas larvas son liberadas por caracoles, las que puede infestar a quien se bañan o entran en contacto con aguas contaminadas. Esta enfermedad es responsable de unas 200.000 muertes por año, en su mayoría en regiones pobres de África. Esta enfermedad es también llamada la enfermedad de las represas, y ha sido detectada en la represa de Itaipú, en la frontera entre Brasil y Paraguay y a solo 17 km de la

triple frontera (con Argentina). Dado que los caracoles huéspedes del gusano han sido detectados en la cuenca del río Paraná, existe claramente la posibilidad que la enfermedad se extienda a la represa de Yacyretá, en la frontera argentino-paraguaya. La Figura 15 muestra la ubicación de ambas represas.

Figura 5-15

Itaipú y Yaciretá. Fuente: Google Earth.



Cuadro 5-13

La esquistosomiasis según el Reporte Epidemiológico de Córdoba N° 1.506

Las helmintosis, causadas por diferentes especies de gusanos, afectan a 1.500 millones de personas. La esquistosomiasis es la enfermedad parasitaria de más alto impacto en mortalidad después de la malaria. La enfermedad afecta a unos 250 millones de personas y anualmente produce 200.000 muertes, esencialmente en el África subsahariana.

Las aguas se contaminan con las excreciones de personas enfermas. Después de pasar por caracoles que son sus hospedantes, las larvas del gusano causante de la esquistosomiasis son liberadas por los caracoles. El contagio tiene lugar por contacto de la piel con las aguas contaminadas. Las larvas atraviesan la piel y se convierten en gusanos de

uno o dos centímetros que infestan los vasos sanguíneos. Las hembras ponen miles de huevos que se alojan, según el tipo de gusano, en el intestino (esquistosomiasis intestinal), o en el útero y la vagina de las mujeres (esquistosomiasis urogenital).

Figura 5-16

Ciclo del esquistosoma. Tomado de <http://blog.ciencias-medicas.com/archives/1774>.



5.6. Bibliografía

Avery A.A. (1999) *Infantile Methemoglobinemia: Reexamining the Role of Drinking Water Nitrates*, Environmental Health Perspectives, 107, 583-586.

Bakir F., Damliji S.F., Amin-Zaki L., Murtadha M., Khalidi A., Al-Rawi N.Y., Tikriti S., Dhahir H.I., Clarkson T.W., Smith J.C., Doherty R.A. (1973). *Methylmercury poisoning in Iraq*, Science 181, 230-241.

Blesa M.A. (2010). Accidentes ambientales en

minería. <http://aargentiniaciencias.org/2/index.php/grandes-temas-ambientales/mineria-y-ambiente/77-accidentes-ambientales-en-mineria>

Boston University School of Public Health (2003). *Lessons from Love Canal*. <http://www.bu.edu/love-canal/main2.html>. Consultado en 2015.

Bundschuh J., Pérez Carrera A., Litter M.I. (Editores) (2008). *Iberoarsen: Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. Ediciones CYTED, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 13 978- 84-96023-61-1.

Castro Mariscal J.R., Saavedra O.M., Wierna N.R., Martos Mula A.J., Rojas M.A., Bovi Mitre M.G. (2010). Metodología para caracterizar el riesgo en sitio contaminado. Caso Abra Pampa (Jujuy, Argentina). *Revista de salud ambiental* 10 (1-2), 65-72.

CCE (1991). Directiva del Consejo 91/676/CEE, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura, DOCE 375/L, DE 31-12-91. EPA 2014. *Basic Information about Nitrate in Drinking Water*. US Environmental Protection Agency. Ver: <http://water.epa.gov/drink/contaminants/basicinformation/nitrate.cfm>

IARC (2001). *International Association of Research on Cancer Monographs*, Volumen 79, 526-527 ISBN 92 832 1220 7. Ver: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol79/mono79-18.pdf>

IPCS (2001) *Arsenic and arsenic compounds*. Ginebra, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (Environmental Health Criteria 224).

Kaper J.B., Morris J.G. Jr., Levine M.M. (1995). *Cholera. Clinical Microbiology Reviews* 8, 48-86. Maniglia T.C., Fonseca I.A., Rodrigues L, Prioli S.M.A.P., Prioli A.J. (2010). *Genetic potential for toxicity: blooms of cyanobacteria in the itaipu reservoir, brazil. Applied ecology and environmental research* 8(3): 267-277.

Nicolli H.B., Blanco M. del C., Paolini J.D., Fiorentino

C.E. (2008). *Ambientes afectados por el arsénico*. En: *Iberoarsen: Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. Capítulo 4, páginas 49-76. J. Bundschuh, A. Pérez Carrera y M.I. Litter (Editores). Ediciones CYTED, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 13 978-84-96023-61-1.

Organización Mundial de la Salud, *Arsenic in drinking water*, WHO/SDE/WSH/03.04/75. Ver: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/arsenic.pdf

Organización Mundial de la Salud (2011). *Lead in drinking water*, WHO/SDE/WSH/03.04/09/Rev/1. Ver: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/lead.pdf.

Palacios A., América L. (1997). *Plaguicidas*. En: *ECO. Introducción a la toxicología ambiental*. Metepec, ECO, 359-82. Ver: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-04a21.pdf>

Paulino C., Apella M.C., Pizarro R., Blesa M.A. (2010). *La contaminación biológica del agua y la desinfección solar*. *Ciencia e Investigación* 60 (4), 12-29.

Smedley P.L., Kinniburgh D.G. (2002). *A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters*. *Applied Geochemistry* 17, 517-568.

State University of New York SUNY Geneseo History Department, 2013. *Love Canal—A Brief History*. https://www.geneseo.edu/history/love_canal_history. Consultado en 2015.

USEPA 2013. *National Priorities List*, <http://www.epa.gov/superfund/sites/npl/>. Consultado en 2015.

6. LAS MATEMATICAS EN LA GESTIÓN AMBIENTAL

6.1. Representación gráfica de algunas funciones matemáticas

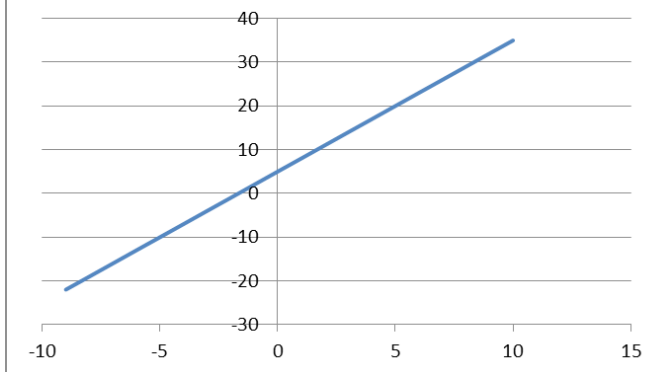
Las funciones matemáticas proveen una "receta" para calcular el valor de la función, que llamaremos "y", si conocemos el valor del argumento, que llamaremos "x". Veamos algunas de las funciones matemáticas más sencillas y usuales:

6.1.1. La función lineal

En el caso más sencillo, y es proporcional a x, y se escribe $y = a x$; a es la constante de proporcionalidad. En el caso más general, cuando $x = 0$, si y no vale 0, y la ecuación se escribe $y = a x + b$, donde b es el valor que toma y cuando $x = 0$. La Figura 1 muestra el gráfico que corresponde a la función lineal.

Figura 6-1

Representación gráfica de la función $y = a x + b$ con $a = 3$ y $b = 5$



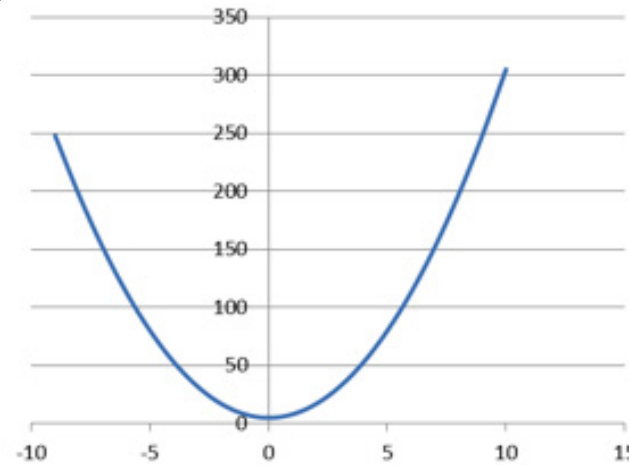
6.1.2. La función cuadrática

Cuando x aumenta, y aumenta como el cuadrado de x. La ecuación toma la forma $y = a x^2 + b$. La

Figura 2 muestra esta función, que es una parábola. Como el cuadrado de un número negativo es positivo, a diferencia de la Figura 1, en la Figura 2, y toma valores positivos cuando x es negativo.

Figura 6-2

Representación gráfica de la función $y = a x^2 + b$ con $a = 3$ y $b = 5$



Si el exponente no es 2, sino un número mayor, el crecimiento es más abrupto (excepto en las cercanías de $x = 0$). En cambio si el exponente es un número comprendido entre 0 y 1 (por ejemplo, 0,5), el crecimiento es más lento que en el caso de la función lineal. Las figuras 3 y 4 muestran los casos con $n=3$ y $n=0,5$, respectivamente.

Figura 6-3

Representación gráfica de la función $y = a x^3 + b$ con $a = 3$ y $b = 5$

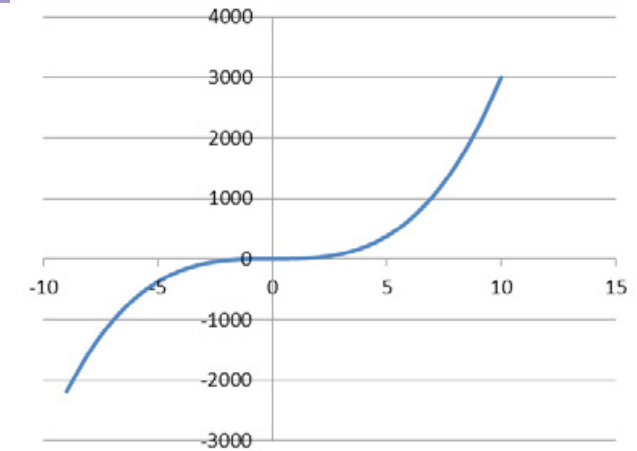
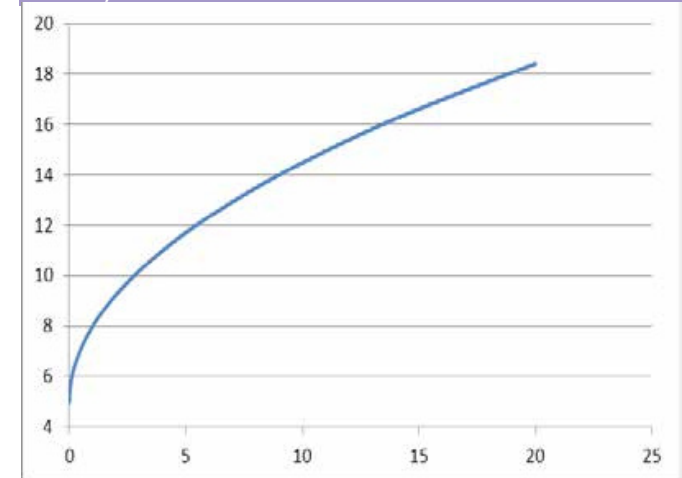


Figura 6-4

Representación gráfica de la función $y = a x^{0,5} + b$ con $a = 3$ y $b = 5$

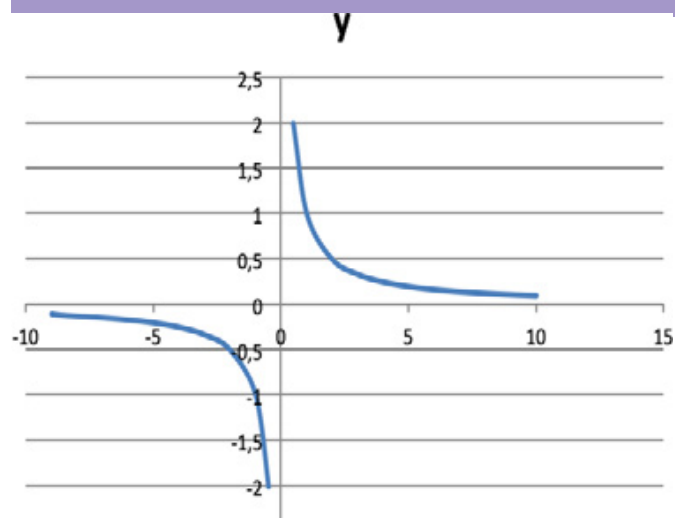


6.1.3. La función hiperbólica

La función hiperbólica corresponde al caso en el que y es inversamente proporcional a x. Se puede escribir

$y = (a/x)$ o $y = a x^{-1}$. La función hiperbólica apareció cuando discutimos la función logística de crecimiento poblacional. La Figura 5 muestra que, al aumentar x , y va disminuyendo. Cuando $x = 0$, y tiende a más infinito o a menos infinito (se dice que y diverge).

Figura 6-5

Representación gráfica de la función $y = (1/x)$ 

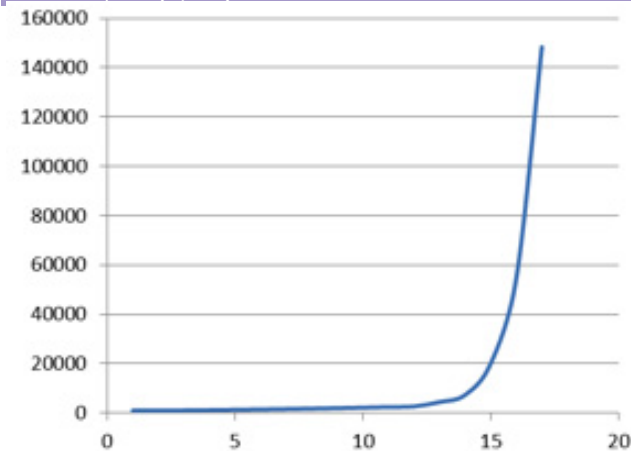
¿Cuántos átomos de hidrógeno hay en 1 gramo de esa sustancia? Ya vimos este tema en el Capítulo 2: 60002300000000000000000, que también escribimos como $6,023 \times 10^{23}$.

¿Cuál es la concentración de protones en el agua de mar? La respuesta es, aproximadamente, 0,00000005 mole por litro. ¿Y en el vinagre puro?: aproximadamente 0,001 moles por litro. Estos dos números pueden escribirse como 5×10^{-8} y 1×10^{-3} , respectivamente. Para escribir números muy grandes o muy pequeños es conveniente entonces usar la notación exponencial, que aprovecha las igualdades $10 = 10^1$; $100 = 10^2$; $1000 = 10^3$; etc., y $0,1 = 10^{-1}$; $0,01 = 10^{-2}$; $0,001 = 10^{-3}$, etc.

El crecimiento exponencial se llama también crecimiento

geométrico: para cualquier valor de x , si se le suma un valor fijo Δx adecuado, y se multiplica por 2. Por ejemplo, en el crecimiento exponencial de la población, donde x es el tiempo y y es el número de pobladores, puede ocurrir que cada 10 años la población se duplique: si en determinado momento la población es 1.000.000, diez años después será 2.000.000, veinte años después 4.000.000, treinta años después 8.000.000, etc. La forma de la ecuación exponencial es $y = a e^{bx}$, que también suele escribirse como $y = a \exp(bx)$. Cuando b es un número positivo, la función describe un rápido crecimiento de y al aumentar x . A la inversa, si b es negativo, la función muestra un rápido decrecimiento de y al aumentar x . En estas ecuaciones, $e = 2,7183\dots$, es un número irracional fundamental en matemáticas. La Figura 6 muestra el crecimiento exponencial.

Figura 6-6

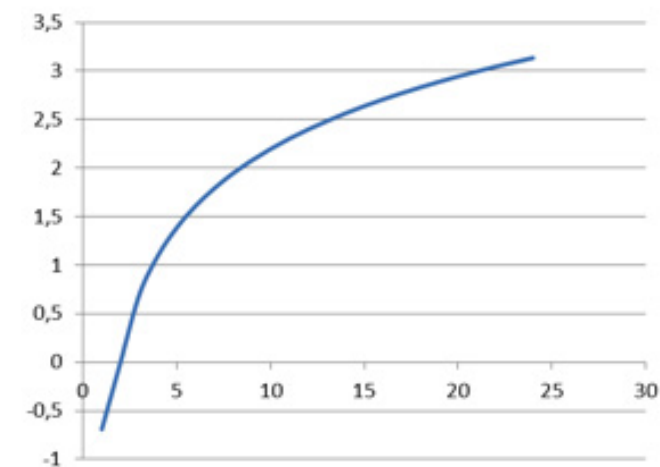
Representación gráfica de la función $y = a e^{bx}$ para $a=1000$, $b=(1/10)$ 

El tiempo que tarda en duplicarse una población determina cuánto vale b . En efecto, ese tiempo es simplemente $0,69/b$. En el ejemplo de la figura el tiempo necesario para duplicar el valor de y es 6,9. Si el eje x es el tiempo en años entonces y se duplica cada 6,9 años.

6.1.4. La función logaritmo

El logaritmo es la función inversa a la exponencial. Si escribimos $y = \ln x$, significa que y es el exponente al cual hay que elevar e para obtener x : $x = e^y$. Es usual también usar los logaritmos de base 10, que son los números a los cuales hay que elevar 10 (y no e) para obtener x . Es así que el log (base 10) de 10 es 1, el de 100 es 2, el de 1000 es 3, etc. La Figura 7 muestra la función logaritmo (base e).

Figura 6-7

Representación gráfica de la función $y = \ln x$ 

Un ejemplo muy importante del uso de la función logaritmo es la definición del pH de las aguas: el pH es, con signo cambiado, el logaritmo (base 10) de la concentración de iones hidrógeno:

$$pH = -\log c_{H^+}$$

Cabe preguntarse por qué se usa una escala logarítmica y no una lineal. Hay dos motivos para ello; el primero, que no discutiremos, tiene que ver con la descripción fisicoquímica de los aspectos energéticos de las reacciones químicas. El segundo motivo es muy sencillo y claro. Las aguas naturales tienen valores de pH que

usualmente van de 5 a 9. En concentraciones, eso significa que c_{H^+} varía desde 0,00001 hasta 0,00000001 mol/L. En otras palabras, las concentraciones varían en cuatro órdenes de magnitud. La situación es aún más extrema en algunos casos, como el del río Agrio en Neuquén, cuyo pH es inferior a 2, por lo que $c_{H^+} > 0,01$ mol/L. La concentración de protones en el río Agrio es seis órdenes de magnitud más alta que en el agua de mar. Resulta entonces más práctico usar la escala logarítmica, pero eso implica que hay que tener algunas precauciones. Por ejemplo, si se mezclan aguas de dos valores de pH diferente, la concentración de protones en la mezcla es el simple promedio de las concentraciones en las dos aguas, pero los valores de pH no se promedian. Por ejemplo, si se mezclan volúmenes iguales (digamos 1 L) de aguas de pH 5 y 7, se puede escribir:

$$C_{mezcla} = 0,5 \times (0,00001 + 0,0000001) \cong 0,000005 \text{ mol / L}$$

En cambio,

$$pH_{mezcla} \neq 0,5 \times (5 + 7) = 6$$

El valor correcto es el logaritmo del valor de concentración calculado antes, cambiado de signo:

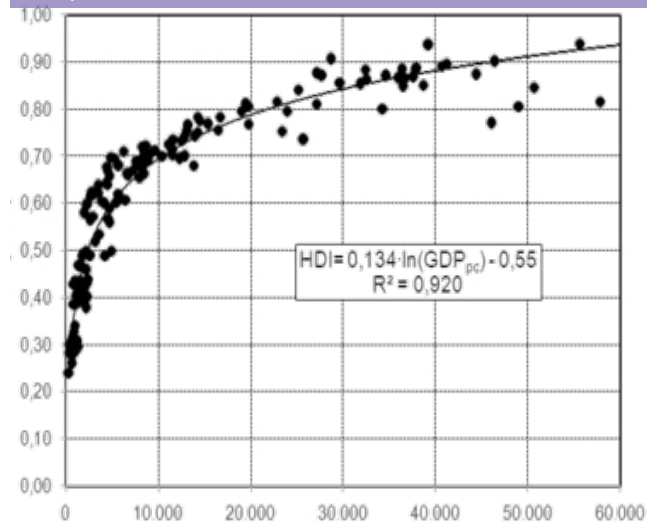
$$pH_{mezcla} = -\log 0,000005 = 5,30$$

En definitiva, no se puede sumar y restar valores de pH.

Otro ejemplo es la correlación entre el Índice de Desarrollo Humano de las naciones (discutido más abajo) y su Producto Bruto Interno por persona, tal como se muestra en la Figura 8. La característica del logaritmo es que al principio aumenta rápidamente, pero para valores grandes de x el logaritmo varía poco al incrementar x.

Figura 6-8

Correlación entre el Índice de Desarrollo Humano medido en el año 2010 y el Producto Bruto Interno, en dólares norteamericanos por persona en distintos países en el año 2009. La curva corresponde a la ecuación $IDH = 0,134 \ln(PBI) - 0,55$. Tomado de Wikipedia. Ver:



6.1.5. Las funciones trigonométricas

La Trigonometría se inicia con el estudio de las relaciones entre los catetos, la hipotenusa y los ángulos de los triángulos rectángulos. Describiremos sólo dos de las funciones, el seno y el coseno. El seno se define como el cociente entre las longitudes del cateto mayor y la hipotenusa, y el coseno como el cociente entre las longitudes del cateto menor y la hipotenusa. Las propiedades que nos interesan del seno y del coseno surgen de su dependencia con los ángulos del triángulo. Estos ángulos se miden en radianes, y sus valores varían entre 0 y 2π , recordando que 2π equivale a 360° . Como estos dos ángulos están vinculados entre sí, ya que suman 90° (o $\pi/2$), se puede escribir tanto el seno como el coseno en función de uno de esos ángulos, llamémoslo α . La Figura 9, modificada de Wikipedia, muestra un triángulo inscripto en una circunferencia. Siguiendo el hipervínculo en la Figura se puede apreciar

cómo van variando el seno y el coseno con el ángulo. La Figura 10 muestra a las funciones seno y coseno. Se ve que ambas funciones son similares, pero desfasadas.

Figura 6-9

Un triángulo rectángulo inscripto en una circunferencia.

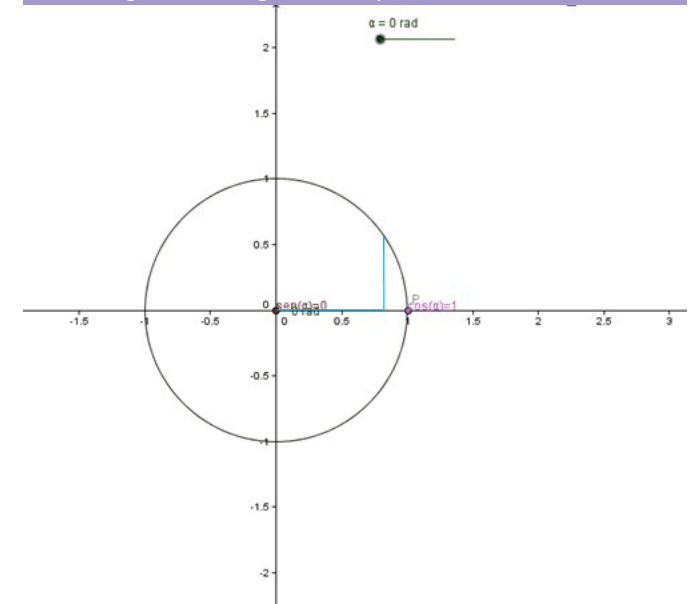
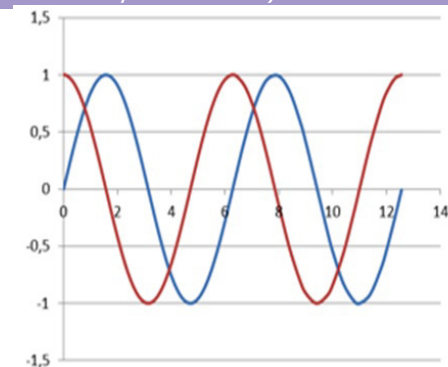


Figura 6-10

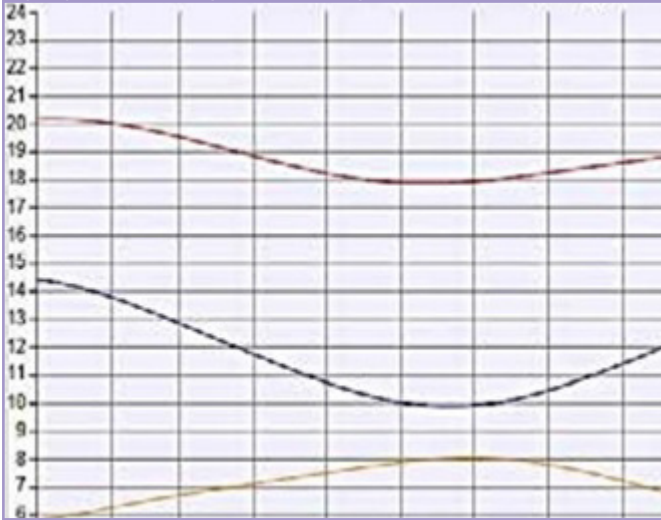
Funciones seno (en azul) y coseno (en rojo). El eje x es el ángulo α en radianes (por ejemplo, para $\alpha = \pi$ $\sin \alpha = 0$ y $\cos \alpha = -1$).



Los comportamientos cíclicos de la naturaleza son descritos matemáticamente por funciones que derivan del seno y del coseno. Un ejemplo es la estructura fina de la Figura 4-29, las variaciones estacionales de la concentración atmosférica de dióxido de carbono. Superpuesta a esta estructura fina, se ve allí la deriva hacia valores cada vez más altos, debidos a la generación antrópica. Otro ejemplo lo provee la duración de los días. Para Buenos Aires, la Figura 6-11 muestra la duración en horas de la luz solar, así como las horas de salida y puesta del sol. Como la duración del día depende de la latitud, del día del año y de la inclinación del eje de rotación de la Tierra, la fórmula que permite calcular la duración del día es una ecuación algo más compleja que un simple coseno, pero sigue siendo una función trigonométrica (ver http://herbert.gandraxa.com/length_of_day.xml).

Figura 6-11

Funciones seno (en azul) y coseno (en rojo). El eje x es el ángulo a en radianes (por ejemplo, para $a = \pi = 3,14$, $\sin a = 0$ y $\cos a = -1$).



6.2. Derivadas e integrales

La Figura 4-7 mostró cómo varía la población con el tiempo. La población es pues una función del tiempo.

La Figura 4-1 a su vez mostró como varía la tasa de crecimiento de la población con el tiempo. Esa tasa de crecimiento es pues también una función del tiempo. La tasa de crecimiento mide cómo cambia la población con el tiempo. Una tasa de crecimiento constante, por ejemplo 10.000 habitantes por año, significaría que la población va creciendo en 10.000 personas por año, y el gráfico de la población en función del tiempo sería una línea recta de pendiente 10.000. No es el caso usual. Como ya se dijo, es más frecuente que sea constante una tasa porcentual de crecimiento. Por ejemplo, si por cada 1.000.000 habitantes, la población crece en 10.000 personas por año, la tasa porcentual de crecimiento es de 1% anual. En este caso, la curva del aumento de población con el tiempo es, como ya se vio, exponencial. Cuantos más habitantes hay, más nuevos habitantes se incorporan cada año. En este caso, la tasa de aumento de la población aumenta linealmente con la población (el gráfico de aumento de la población en función de la población es una línea recta, cuya pendiente es la tasa porcentual de crecimiento dividida por 100).

Si llamamos P a la población (número de habitantes), T a la tasa de crecimiento (número de habitantes que se incorporan cada año) y t al tiempo, las ecuaciones son:

$$P = f(t)$$

$$T = f'(t)$$

Si la tasa es constante,

$$T = K \text{ (independiente del tiempo)}$$

y

$$P = P_0 + K t$$

(Aquí P_0 es la población en el instante que se ha elegido como tiempo cero).

Si la tasa es proporcional a la población,

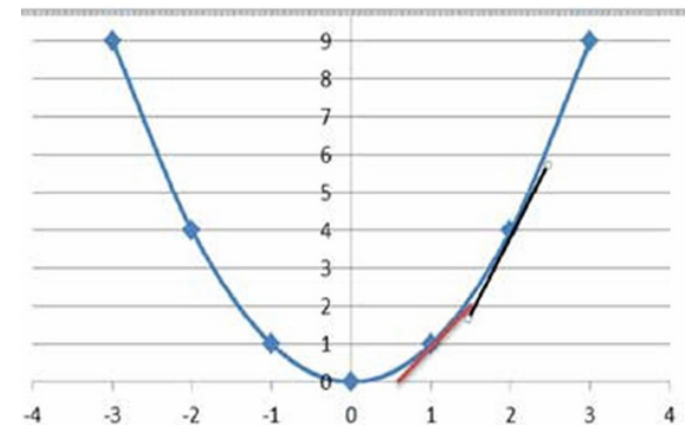
$$T = k P$$

Se ve pues que ambas funciones están matemáticamente vinculadas: los matemáticos dicen que la población es la **integral** de la tasa de crecimiento, y la tasa de crecimiento es la **derivada** de la población.

En términos generales, una función $y = f(x)$ asigna valores a y para cada valor de x . La derivada de la función y suele escribirse como $y' = f'(x)$, o también $dy/dx = f'(x)$. La derivada nos da los valores de la tasa de cambio de $f(x)$ con x . En un gráfico de y en función de x , la tasa de cambio (la derivada) es la pendiente de la curva en cada valor de x . La Figura 12, como ejemplo, muestra la función $y = f(x) = x^2$, y los valores de la derivada, la pendiente, para $x = 1$ y para $x = 2$. Resulta ser que en este caso $dy/dx = 2x$.

Figura 6-12

La función $y = x^2$ (en azul), y las pendientes (la derivada) para $x = 1$ y para $x = 2$



6.3. Funciones de distribución

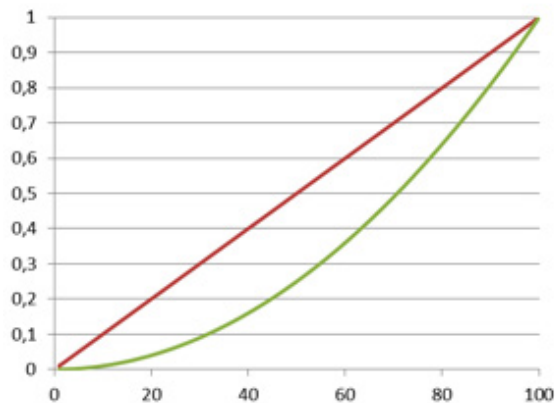
Las funciones de distribución describen cómo se distribuye una determinada magnitud entre los individuos de una población grande. Por ejemplo:

- Cómo se distribuyen las edades en una población: cuántos individuos de cada edad hay.
- Cómo se distribuyen los ingresos: para cada nivel de ingresos, cuántos individuos hay.
- En un conjunto grande de mediciones de un determinado parámetro, cómo se distribuyen los resultados en función del valor medido.

Una forma usual de representación es a través de los gráficos acumulativos. Por ejemplo, si vamos a describir la masa corporal de los individuos de una población, podemos poner en el eje x el número de individuos, y en el eje y, la masa total de todos los individuos hasta ese valor de x. Imaginemos que todos los individuos tienen la misma masa corporal. Resulta una línea recta de pendiente igual a la masa de un individuo, como se muestra en la Figura 6-13 en rojo. Sin embargo, siempre habrá individuos de masas distintas. Si graficamos las masas acumulativas, comenzando por la de los individuos más pequeños, se obtiene la curva en verde de la Figura 6-13. Esa curva se conoce como curva de Lorenz: cuanto más se separe de la recta, más despareja será la distribución de masas corporales.

Figura 6-13

Distribución acumulativa (curva de Lorenz). La curva está normalizada para tomar el valor 1 cuando se toma en cuenta el 100% de la población. En rojo, distribución en el caso idealmente igualitario. En verde, un ejemplo de un caso real cualquiera.



También es frecuente presentar funciones de distribución, no acumulativas: a cada valor de x se indica la probabilidad de obtener ese valor. Una función de distribución muy importante es la *función de distribución normal* que corresponde a la ecuación:

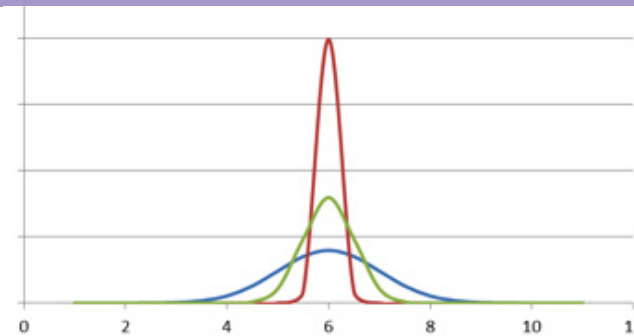
$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Esta función tiene dos parámetros: la desviación estándar σ , que mide el ancho de la distribución, y μ , que es el valor más probable, el valor de x que corresponde a la máxima probabilidad. La Figura 14 muestra tres curvas de distribución normal, dibujadas para $\mu = 5$, y para tres valores de σ : en rojo, $\sigma = 0,2$; en verde, $\sigma = 0,5$, y en azul, $\sigma = 1$. En una serie de mediciones repetitivas en el laboratorio, los resultados se distribuyen según esta ecuación: las mediciones muy precisas tienen bajos valores de σ , y las mediciones muy exactas tienen un valor de μ que es el correcto. (Este tema se retoma más abajo).

Para nuestros fines es también muy importante la distribución *log-normal*. En este caso, la magnitud en sí misma no se distribuye normalmente, pero sí lo hace su logaritmo. Un ejemplo típico es la distribución de masas corporales de individuos en una población.

Figura 6-14

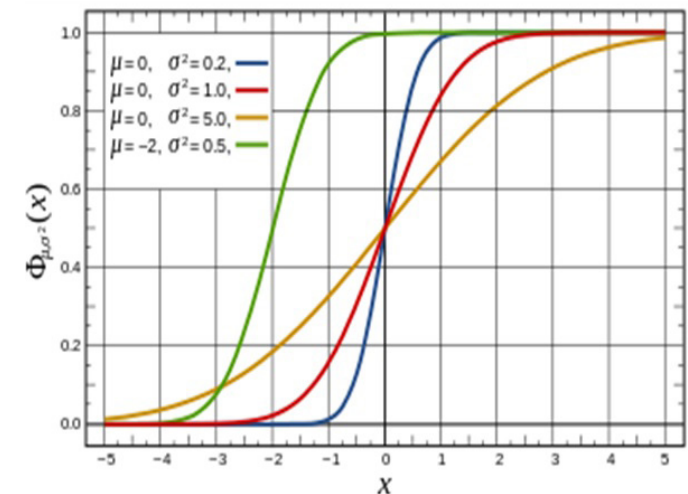
Funciones de distribución normales, con $\mu = 5$, con tres valores de σ : en rojo, $\sigma = 0,2$; en verde, $\sigma = 0,5$, y en azul, $\sigma = 1$.



A veces, se puede encontrar la presentación de las funciones acumulativas que corresponden a las funciones normales o log-normales: en lugar de graficar la probabilidad de obtener cada valor, se grafica la probabilidad de obtener cualquier valor igual o menor a x, en función de x. La función cumulativa (correspondiente a la distribución normal) se muestra en la Figura 6-15.

Figura 6-15

Función acumulativa correspondiente a la distribución normal. Fuente: Wikipedia



Existen otras funciones de distribución, como la de Lorentz (no confundir con la curva de Lorenz), o la de Poisson, de menos importancia para nuestros fines, y que no discutiremos.

6.4. Tratamiento estadístico de resultados de mediciones experimentales

El laboratorio químico informa el resultado de sus mediciones mediante números, y los valores guía establecidos por las reglamentaciones son también números. Es importante tener en claro algunas características de estos números.

6.4.1. Las mediciones en el laboratorio

Supongamos que con una técnica *adecuada* se mide la concentración de arsénico en una muestra de agua. Veamos primero qué se requiere para que la técnica sea adecuada.

En primer lugar, la *sensibilidad* de la medición debe ser suficientemente alta como para poder medir la sustancia en el rango de concentraciones que nos interesa. Por ejemplo, supongamos que el equipamiento que estamos usando para medir arsénico en agua registra señales sólo cuando la concentración supera las 20 ppb. En ese caso, para cualquier muestra que contenga menos de 20 ppb, el informe del laboratorio dirá: As: < 20 ppb, o As: ND (No Detectado). Ahora bien, el Código Alimentario Argentino está actualmente haciendo un cambio del valor máximo permitido de 50 a 10 ppb. Mientras sea de aplicación el valor más alto, la técnica empleada es adecuada; en cambio, cuando entra en vigencia el nuevo límite, la técnica usada es inadecuada. Además, los químicos distinguen entre el *límite de detección* y el *límite de cuantificación* de un procedimiento. El primero es el valor más bajo que produce una señal en el instrumento de medición. A partir de allí, y en un rango estrecho de concentraciones, la señal registrada es tan ruidosa que no sirve para cuantificar el contenido de la sustancia que se está analizando. Recién por encima del límite de cuantificación es posible informar valores cuantitativos. El problema de la sensibilidad de los métodos analíticos no es indiferente en la legislación ambiental. No es práctico ni razonable establecer límites máximos permitidos que puedan medirse únicamente con técnicas muy sofisticadas, caras y poco accesibles.

En segundo lugar, la señal que registra nuestro aparato de medición debe ser *específica*: debe producirse solamente por la sustancia que queremos medir. En la práctica, no es infrecuente que otras sustancias puedan también producir una señal, y en esos casos los resultados estarán viciados. La especificidad es otro requerimiento de una técnica adecuada.

En tercer lugar, la *reproducibilidad* de la medición debe ser adecuada. Si se repite exactamente el procedimiento

de medición, desde la toma de muestra hasta la obtención del resultado, y se encuentran valores muy disímiles, la técnica no es adecuada. Ninguna técnica reproducirá exactamente el mismo valor si se repite varias veces la medición, pero la dispersión de los valores medidos debe ser adecuadamente pequeña. Esa dispersión debe informarse, estableciendo cuál es el error de la medición; este tema se describe más abajo.

En cuarto lugar, la *precisión* de la medición debe ser adecuada. No basta que la repetición produzca siempre el mismo resultado: éste debe corresponder con el valor real de la muestra. Para dar un ejemplo muy pedestre, si medimos el largo de una mesa de 80 cm con una cinta métrica de costurera (las de tela), que se ha ido estirando con el tiempo, y repetimos muchas veces la medición, obtendremos 78,9; 79,0; 79,0; 79,1; 79,0 cm; etc. La reproducibilidad es adecuada, alrededor de un promedio de 79,0 cm, pero nuestra medición tiene un error sistemático importante, debido a una calibración defectuosa del instrumento de medición. Normalmente, para calibrar las mediciones en el laboratorio químico se usan *patrones de referencia*, cuyo contenido está garantizado por procedimientos muy rigurosos. El uso de patrones inadecuados conduce a valores viciados.

Por todos estos motivos, los laboratorios analíticos suelen participar en procedimientos de comparación entre laboratorios, en los cuales se detecta cualquier posible error en los procedimientos analíticos.

6.4.2. ¿Cómo describir el error de las mediciones?

Si se hace repetitivamente una medición y se obtienen números muy parecidos entre sí, se informa el promedio de esos valores. A continuación, en la Tabla 1, se muestran dos conjuntos de medidas que arrojan el mismo promedio, pero que tienen una dispersión muy distinta. La última columna indica el promedio.

Tabla 6-1. Ejemplo imaginario de dos series de mediciones que arrojan el mismo promedio pero tienen dispersiones diferentes.

Medida	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	Promedio
Serie 1	10,0	9,8	9,9	9,8	10,0	10,1	9,93
Serie 2	10,2	10,4	9,3	9,8	9,3	10,6	9,93

La dispersión se mide mediante la desviación estándar σ , que resulta de sumar las diferencias entre cada valor y el promedio, elevadas al cuadrado, dividir las por el número de mediciones y sacar a ese número la raíz cuadrada; en el ejemplo de la Tabla, si llamamos N al promedio, y n_1, n_2, n_3, \dots a los valores medidos, σ es:

$$\sigma = \{[(n_1 - N)^2 + (n_2 - N)^2 + (n_3 - N)^2 + (n_4 - N)^2 + (n_5 - N)^2 + (n_6 - N)^2] / 6\}^{0,5}$$

El lector puede comprobar que la desviación estándar de la serie 1 es 0,11 y la de la Serie 2 es 0,51. Una forma usual de describir el error de una medición es indicar el valor de σ , o de la desviación estándar fraccionaria, que en los caso de la Tabla serían los valores de σ divididos por el promedio (9,93), o la desviación estándar fraccionaria porcentual, resultante de multiplicar por 100 el valor anterior. La Tabla 2 indica los valores de estas magnitudes para las dos series de la Tabla 1.

Tabla 6-2. Valores de la desviación estándar para los ejemplos de la Tabla 1

	σ	σ/N	100 (σ/N)
Serie 1	0,11	0,011	1,1%
Serie 2	0,51	0,051	5,1%

Como ya se indicó, la desviación estándar está relacionada con el ancho de la distribución de los valores medidos (ver Figura 6-14). Los lectores interesados en este tema pueden consultar la bibliografía (Blesa y col 2012, Young 1962).

6.4.3. El significado de los valores guía

La Toxicología brinda herramientas para evaluar la toxicidad, tanto crónica como aguda de las distintas sustancias. Desde el punto de vista de la Gestión, esas herramientas desembocan en el establecimiento de *valores guía* de diversos tipos. El procedimiento es sin embargo muy elaborado, y el resultado final es sólo una aproximación simplificada que pretende describir con un número una realidad compleja. Ya se vio en el Capítulo 4 que existen diversos valores que indican los riesgos de ingesta o inhalación de un tóxico, como la dosis de referencia RfD, el *nivel máximo al que no se observan efectos adversos*, NOAEL (*No Observed Adverse Effect Level*), el *nivel más bajo al cual se observan efectos adversos* LOAEL (*Lowest Observed Adverse Effect Level*), el *valor provisional máximo de la ingesta tolerable semanal* (PWTI, *provisional tolerable weekly intake*), la *ingesta diaria tolerable* (TDI, *total daily intake*), etc. Aquí queremos enfatizar los aspectos matemáticos subyacentes en los números finales. La compleja evaluación toxicológica implica definir cuánto aumenta el riesgo de algún efecto adverso cuando aumenta la dosis o la exposición.

Veamos como ejemplo la forma de derivar números para el caso del cianuro, tomada del informe de la Organización Mundial de la Salud (WHO 2009). Los datos de intoxicación aguda son muy inciertos y no pueden usarse; por eso se usan los resultados de un estudio en el que se administró cianuro de sodio a ratas y ratones durante 13 semanas. Este estudio condujo, con un tratamiento estadístico adecuado de los datos, a un valor de NOAEL de 4,5 mg de cianuro por kg de masa corporal. Para extrapolar a humanos se aplicó un factor de seguridad de 100, lo que condujo a un valor de TDI de 0,045 mg de cianuro por kg de masa corporal. Se supone luego que el agua de bebida aporta el 40% de la TDI; de esa manera se toma en cuenta que los alimentos pueden estar aportando el 60% de la TDI. Se hace entonces el cálculo para un adulto de 60 kg que ingiere 2 litros de agua por día, y se llega al valor límite de 0,5 mg por litro de cianuro en el agua de consumo. Así las cosas, el Código Alimentario Argentino establece un límite de 0,10 mg por litro. Puede apreciarse que los

valores establecidos no son “una verdad revelada”, sino aproximaciones que pretenden describir: (a) el estado del conocimiento derivado del tratamiento estadístico de datos obtenidos en estudios epidemiológicos y de laboratorio; (b) la factibilidad de alcanzar esos límites, y la disponibilidad de técnicas analíticas de medición; (c) factores de seguridad muy conservadores para tener en cuenta lo aproximado que es el conocimiento de la toxicología y la gran variabilidad estadística entre individuos.

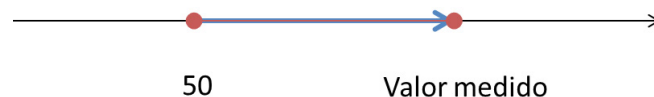
6.5. Vectores para describir alejamiento de los parámetros químicos con respecto a los valores considerados como adecuados

Los vectores brindan una representación geométrica de una magnitud física. Los vectores se definen por su módulo, su dirección y su orientación. Se los representa con flechas, y el módulo es la longitud de la flecha, y su dirección y su orientación se definen por su ubicación en el espacio.

Supongamos que nos interesa solo un parámetro químico, por ejemplo, la concentración de nitrato. Para este parámetro, supongamos también que se ha establecido como valor aceptable $c_a = 50 \mu\text{g/L}$. Si representamos en un eje la concentración de nitrato, y marcamos el valor aceptable, la desviación se puede medir por el vector que une a ese punto con el valor medido. La Figura 6-16 lo muestra gráficamente.

Figura 6-16

Un vector en un espacio unidimensional. Concentración de nitrato medido y nivel de referencia



La longitud (el módulo) de ese vector es por supuesto $(c_m - c_a)$, donde c_m es el valor medido. Cuanto peor es la calidad del agua, más largo es el vector.

Si el valor medido es inferior al de referencia, para el

cálculo del indicador se asigna el valor de 0 a la longitud del vector (calidad óptima).

Imaginemos ahora que hay dos parámetros que interesan, por ejemplo, nitrato y fosfato. Nuestra representación gráfica será ahora bidimensional. Habrá ahora dos valores de c_m y dos de c_a . La situación se describe en la Figura 6-17, que muestra el vector que describe la desviación de los datos experimentales $c_{m1} = 5$ y $c_{m2} = 12$ con respecto a los valores de referencia $c_{a1} = 3$ y $c_{a2} = 8$. Usando el teorema de Pitágoras, puede verse que la longitud del vector (su módulo) está dada por la ecuación:

$$L = \sqrt{[(c_{m1} - c_{a1})^2 + (c_{m2} - c_{a2})^2]}$$

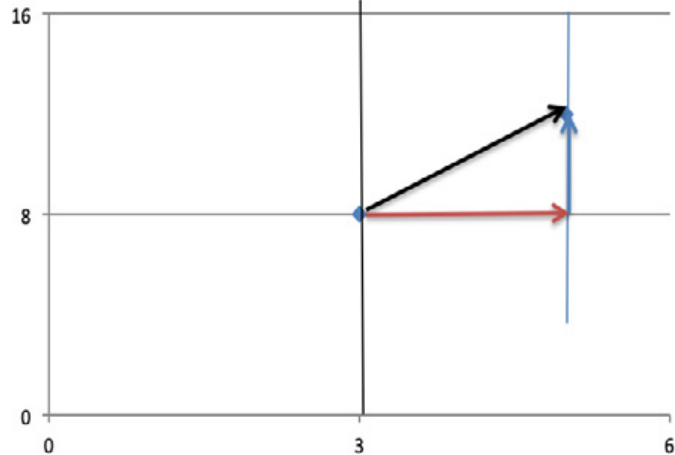
En definitiva, el vector que nos interesa es la suma vectorial de los dos vectores que corresponden cada uno a cada uno de los parámetros medidos (estos últimos vectores están indicados en la Figura 6-17 en azul y en rojo).

Los vectores quedan definidos solo para el cuadrante superior derecho del dibujo, es decir cuando ambos parámetros superan los valores de referencia. Si alguno de los dos valores medidos no supera al de referencia, ese parámetro debe ignorarse y volvemos al caso de una sola dimensión.

Esta expresión se generaliza de inmediato para el caso de tres parámetros, con una representación tridimensional. Para más de tres parámetros, la expresión matemática es totalmente similar, aunque en estos casos es difícil representar gráficamente todas las dimensiones. En el Capítulo 2, al discutir el índice canadiense de calidad de aguas CCMEWQI se vio el uso de esta forma de sumar vectores.

Figura 6-17

Un vector para representar la distancia entre dos puntos en un espacio bidimensional.



6.6. La construcción de índices para describir realidades complejas

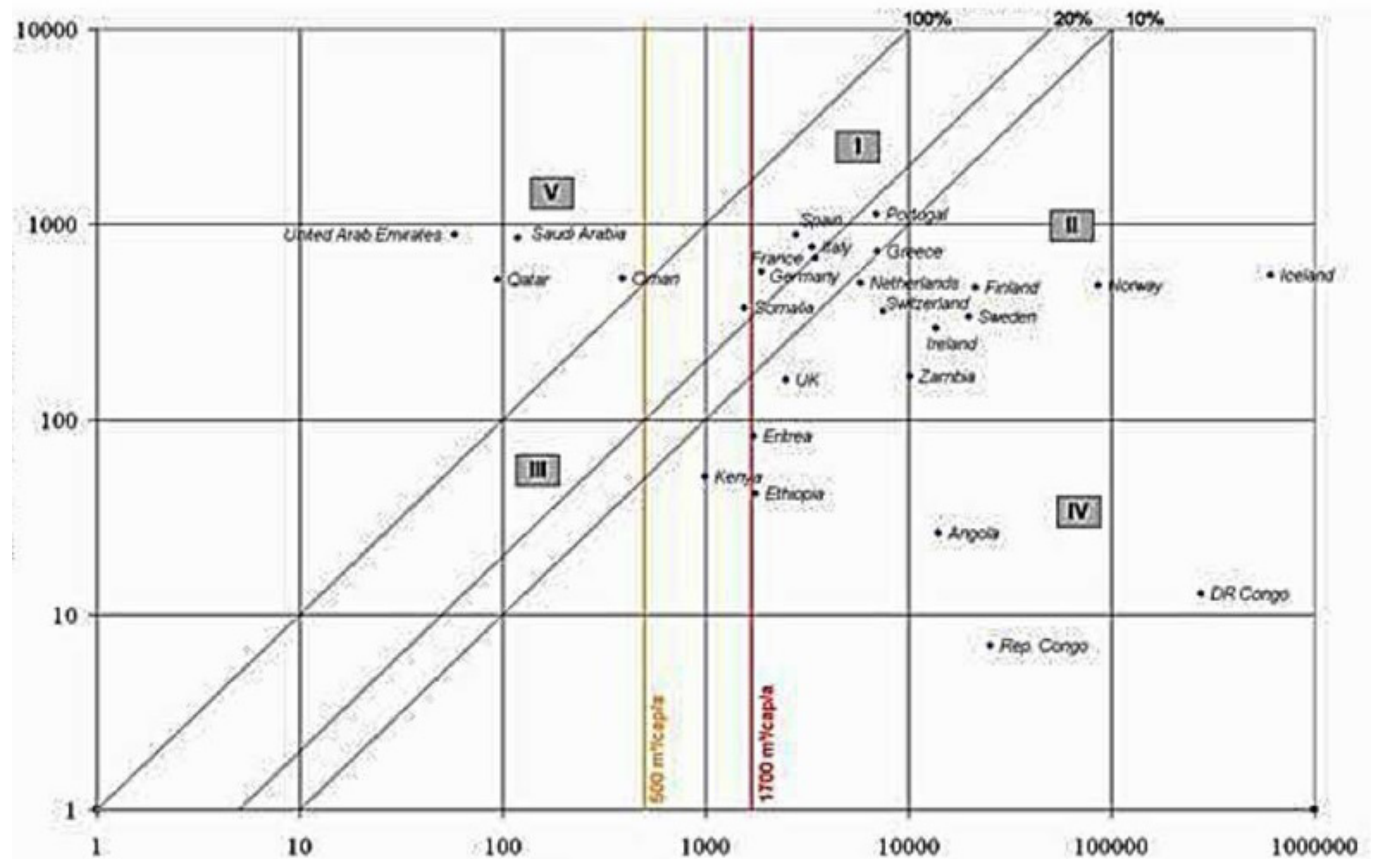
6.6.1. Indicadores e índices

Para describir situaciones ambientales se usan indicadores. Cada uno de esos indicadores señala un aspecto de los muchos que son de importancia cuando se busca evaluar la situación ambiental de una región o de un país. Estos indicadores son números con un significado claro, aunque debe recalarse que su medición no está libre de ambigüedades, y representan sólo aproximaciones. Estos indicadores representan siempre un promedio que surge de muchas mediciones y estimaciones, por lo que su error puede ser importante.

Un indicador muy usado fue desarrollado por Falkenmark para describir el estrés hídrico. El indicador es simplemente la cantidad de agua dulce renovable que dispone cada habitante (de un país, de una región) por año. Según los valores del indicador se definen situaciones de: estrés hídrico (por debajo de 1.700 m³ de agua dulce renovable por habitante y por año); escasez hídrica (por debajo de 1.000); escasez hídrica absoluta (por debajo de 500). También se ha propuesto

Figura 6-18

Demanda hídrica en m³ por persona y por año (eje vertical) en función de la disponibilidad hídrica en m³ por persona y por año en varios países. Las tres rectas indican situaciones de uso del 100%, 20% y 10% del agua disponible. Los países ubicados arriba y a la izquierda consumen más agua que la disponible y se encuentran en situaciones críticas.



usar como indicador el cociente entre la cantidad de agua extraída de los acuíferos (superficiales y subterráneos)- la demanda de agua-, y la cantidad total (recarga anual de los mismos)- la disponibilidad de agua-. La Figura 6-18 muestra la situación de algunos países según estos indicadores (tomada de http://environ.chemeng.ntua.gr/WSM/Newsletters/Issue4/Indicators_Appendix.htm).

Los indicadores tienen muy poca flexibilidad para describir situaciones complejas. Por ese motivo, a partir de los indicadores se construyen los índices. A lo largo de este libro ya hemos descrito algunos índices: los índices de calidad de aire o de aguas, el índice de desarrollo humano. En la vida cotidiana estamos en contacto con otros, de los cuales el más popular es probablemente el índice de precios al consumidor. En Gestión Ambiental es importante estar familiarizado

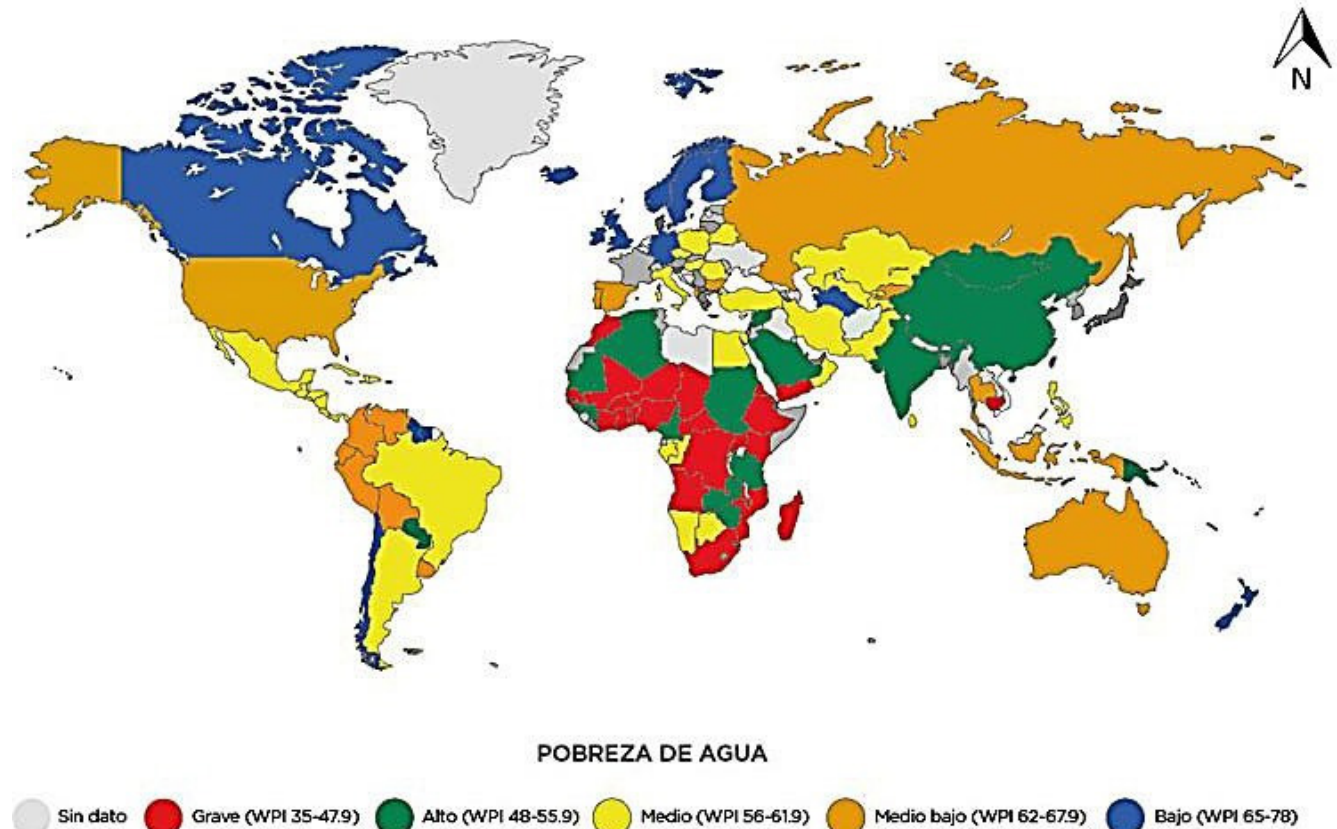
con otros índices, como el Índice de Gini, el Índice de Escasez de Agua, o el Índice de Felicidad. En esta sección describimos el procedimiento de construcción de estos índices, para poder comprender mejor sus alcances y sus limitaciones.

Índice de Gini (o Coeficiente de Gini). Debemos hacer referencia a la Figura 6-13, para el caso en que el eje vertical represente ingresos. La distribución de ingresos medida, por ejemplo en cada país, conducirá a una curva como la verde, que puede estar más lejos o más cerca de la recta idealmente igualitaria. El índice de Gini es simplemente el cociente entre el área entre la curva real y la línea recta y el área bajo la recta idealmente igualitaria. El índice de Gini puede variar entonces entre 0 y 1 (o, alternativamente, si se lo multiplica por 100, entre 0 y 100). 1 representa un caso extremo, en el cual toda la riqueza está en manos de una sola persona, y 0 representa el otro caso extremo, el de la distribución totalmente igualitaria: todos los individuos tienen el mismo ingreso. Para tener una idea, según el Banco Mundial, en 2009, el índice de Gini en Argentina era 44,1, en Brasil 53,7, en Chile 49,0 y en Uruguay 45,6, mientras que en 2017 los valores publicados son 41,2; 53,3; 46,6 y 39,7 respectivamente (ver: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SI.POV.GINI?view=map&year=2009> y <https://datos.bancomundial.org/indicador/SI.POV.GINI?view=map&year=2017>).

Índice de Pobreza Hídrica. Este índice fue desarrollado por C.A. Sullivan (Sullivan y col. 2003), según sus propias palabras, como una herramienta holística para medir el stress del agua a nivel de hogares y de comunidades, diseñado para ayudar a los tomadores de decisiones nacionales, en los niveles de gobiernos comunales y centrales,... a determinar necesidades prioritarias de intervención en el sector del agua. El índice combina, en un solo número, un clúster de datos relevantes, directa o indirectamente, al stress hídrico. Los subcomponentes del índice incluyen medidas de: acceso al agua; cantidad de agua; calidad y variabilidad; usos del agua (domésticos, alimentos, procesos productivos); capacidad para la gestión del agua; y aspectos ambientales.

Figura 6-19

Mapa del Índice de Pobreza Hídrica, con sus cinco componentes: Cuanto mayor es el índice, menor es la pobreza hídrica. Tomado de Lawrence y col. (2003), según adaptación de http://aquabook.agua.gob.ar/1026_0.



Se ve pues que es claramente una herramienta para la gestión. La Figura 6-19 muestra la distribución por países, tomada de http://aquabook.agua.gob.ar/1026_0 donde a su vez fue adaptada de Lawrence y col. (2003).

El índice tiene cinco componentes, que a su vez surgen de un promedio pesado de diversos indicadores. Los componentes son recursos, acceso, capacidad, uso y ambiente. La selección de indicadores, componentes y

pesos relativos conduce a resultados que muestran las limitaciones del índice; es posible, si se quiere, criticar tanto a cualquier índice como se critica al famoso índice de precios al consumidor.

Índice de Desarrollo Humano. Este índice es elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Pretende reflejar las condiciones sociales de los distintos países, y varía entre 1 (óptimo) y 0 (muy malo). Resulta de promediar dos indicadores

(la esperanza de vida al momento de nacer y el Producto Bruto Interno por persona medido en dólares internacionales) y un tercer componente, educación, que es a su vez un promedio que toma en cuenta varios indicadores. La Figura 6-20 muestra el mapa en código de colores de los valores del IDH 2018. Es frecuente ordenar los países de mayor a menor, desde Noruega (Nº 1, IDH = 0,953) hasta Níger (Nº 189, IDH=0,354). En ese orden la Argentina ocupa el puesto Nº 47 (IDH=0,825), en el grupo de desarrollo humano muy alto.

Índice del Planeta Feliz. Simplemente, a modo de ejemplo de las limitaciones de todos los índices, mencionemos este índice, desarrollado en un intento de medir "los años de vida feliz por persona (esperanza de vida corregida por sensación de bienestar) obtenidos por unidad de recursos usados". En este curioso índice, Costa Rica encabeza el ranking, mientras que Noruega cae al puesto 29. Argentina está en el puesto 17. La fórmula usada para calcular este índice es:

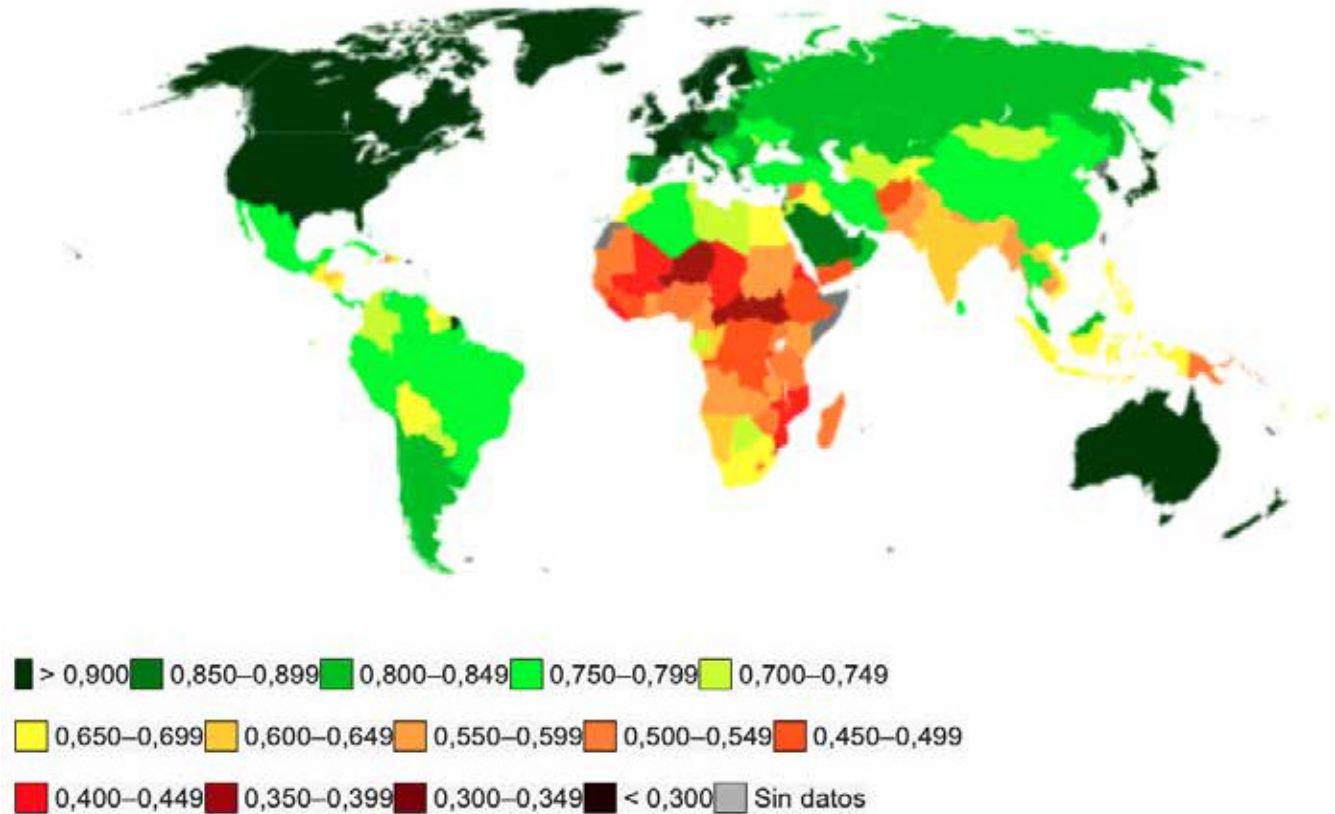
$$\text{HPI} = (\text{Esperanza de vida}) \times (\text{Sensación de Bienestar}) / (\text{Huella ecológica})$$

Demás está decir que la sensación de bienestar es una "magnitud" difícil de cuantificar. La esperanza de vida es un número derivado estadísticamente, con las incertezas del caso, y la huella ecológica es en sí mismo un elaborado índice que toma en cuenta una serie de factores, como se discute a continuación.

Huella ecológica. Este índice busca cuantificar la relación entre los recursos renovables consumidos por el hombre, en términos del número de hectáreas necesarias para producir los bienes y servicios consumidos por persona. Se deriva un índice adicional, la biocapacidad, comparando ese valor con el número de hectáreas que posee el país o la región para producir los mismos bienes y servicios. Ambos índices resultan de la evaluación de diversos parámetros (tierras de cultivo, tierras de pastoreo, forestas, pesquería, emisiones de dióxido de carbono y tierras construidas). La Figura 21 muestra que América Latina y el Caribe, así como Oceanía, tienen una reserva ecológica positiva (mayor oferta que consumo), lo mismo que el

Figura 6-20

Mapa del Índice de Pobreza Hídrica, con sus cinco componentes: Cuanto mayor es el índice, menor es la pobreza hídrica. Tomado de Lawrence y col. (2003), según adaptación de http://aquabook.agua.gob.ar/1026_0.



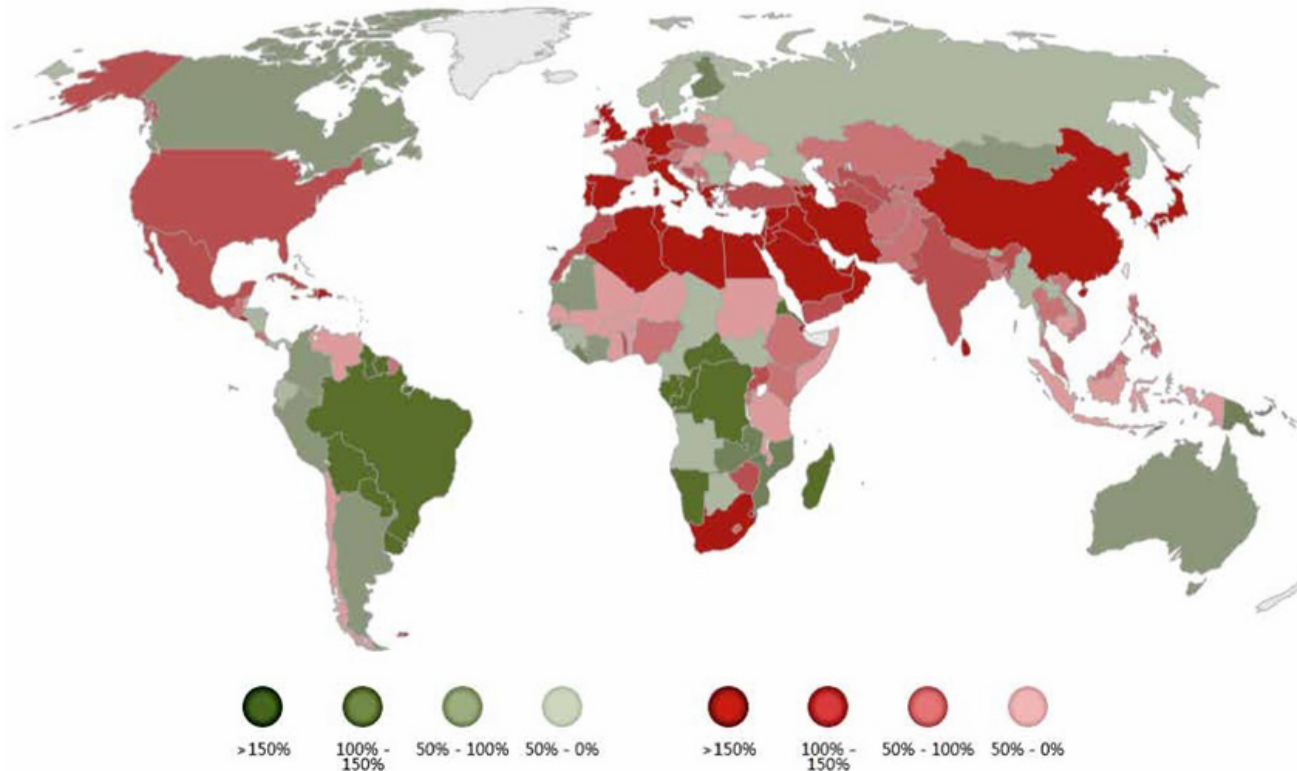
África Subsahariana (excepto Sudáfrica), y el resto de las regiones tiene un déficit en su huella ambiental (datos de 2013, del Global Footprint Network, <http://www.footprintnetwork.org>).

La huella ecológica, como otros índices ya mencionados, muestra una correlación aproximadamente logarítmica con el Índice de Desarrollo Humano, mientras que los valores de reserva neta o déficit se distribuyen sin guardar relación con el IDH. Es así que Canadá y EE.UU. tenían en 2013 una huella ecológica por persona

parecida (8,72 y 8,38, respectivamente), pero Canadá tiene una biocapacidad por persona alta (15,93) en contraste con EE.UU. (3,53), por lo que la diferencia entre ambos números es +7,21 para Canadá, y -4,85 para EE.UU. También se observan diferencias análogas en países de IDH bajos. En el caso de la Argentina, en 2013 los valores eran 3,61 para la huella ecológica por persona, y de 6,59 para la biocapacidad por persona.

Figura 6-21

Mapa de comparación de la huella ecológica con la biocapacidad. Los países en verde o en gris tienen reserva positiva, mientras que los países en rojo o rosa tienen déficit de biocapacidad. Tomado de: <https://data.footprintnetwork.org>.



Huella ambiental. La huella ambiental es un indicador que busca describir el impacto ambiental total producido por la manufactura de un producto, o por una organización. Para ello recurre al análisis del ciclo de vida. La definición legal que da la unión Europea es la siguiente (https://eurlex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013H0179&from=ES#n tc13-L_2013124ES.01000 601-E0013):

La huella ambiental de los productos (HAP) es una medida multicriterio del comportamiento ambiental de un bien o servicio a lo largo de su ciclo de vida...

Ciclo de vida: etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.

De forma análoga define la huella ambiental de las organizaciones:

La huella ambiental de las organizaciones (HAO) es una medida multicriterio del comportamiento ambiental de una organización que proporciona bienes o servicios, con la perspectiva de todo el ciclo de vida.

Especialmente por las decisiones políticas de la Unión Europea, el uso del análisis de ciclo de vida y la huella ambiental de productos y organizaciones está tomando una gran importancia con miras a la adecuación del comercio exterior. En 2018 la Fundación Innovación y Tecnología (FUNINTEC) de la Universidad Nacional de San Martín, organizó, en el marco de su serie de encuentros FUTUROS (Un foro para debatir, pensar e informar acerca del futuro, las nuevas tecnologías y los desafíos que enfrenta la humanidad), el encuentro FUTUROS: Huella Ambiental. Está programado para 2019 la publicación del correspondiente libro, que será una excelente guía de estudio del tema. Ver: <https://www.funintec.org.ar/huellas-ambientales/>.

6.7. Los modelos matemáticos de fenómenos complejos

Se dice que la matemática es el lenguaje de las ciencias. Con esa expresión se busca ilustrar una característica fundamental de las ciencias físicas y naturales: a partir de la observación y de la experimentación, se definen magnitudes que se pueden medir cuantitativamente, y con ellas se arma un modelo matemático que busca describir la realidad. Ese modelo en los casos más sencillos es simplemente una ecuación matemática. Por ejemplo, Newton estableció una relación entre la fuerza **F** que se aplica a un cuerpo de masa **m** y la aceleración **a** que adquiere el mismo:

$$F = m \times a$$

Esta ecuación matemática es un modelo matemático sencillo de la realidad. Una de las características fundamentales de los modelos matemáticos de la realidad física es que deben tener capacidad predictiva. En el ejemplo que discutimos, se puede calcular la aceleración que alcanzará un cuerpo de masa **m** sometido a una fuerza **F**, y después comprobar que efectivamente eso ocurre. La aceleración **a** mide cómo cambia la velocidad **v** con el tiempo, es la derivada de **v** con respecto a **t**:

$$a = dv / dt$$

A su vez, la velocidad mide la longitud ℓ recorrida en un tiempo t ; es la derivada de ℓ con respecto a t :

$$v = d\ell / dt$$

Resolviendo estas ecuaciones se puede calcular a qué distancia se encontrará el objeto al cabo de un tiempo t si se la aplica una fuerza \mathbf{F} . Un ejemplo muy conocido es el de la aceleración causada por la fuerza gravitacional. Para el caso de la superficie de la Tierra, esa fuerza es tal que genera una aceleración de $9,8 \text{ m/s}^2$ en la caída libre de un objeto, cualquiera sea su masa²¹. El lenguaje de las Matemáticas es el que nos permite hacer predicciones cuantitativas. Por ejemplo, se puede predecir qué altura alcanzará una piedra, inicialmente en reposo, lanzada hacia arriba con una fuerza dada \mathbf{F} . Se puede predecir también cuánto tardará en alcanzar esa altura máxima, y cuánto tardará en volver a caer. Es posible pues hacer proyecciones en el tiempo, predecir qué ocurrirá en el futuro a partir de una dada situación inicial.

Los modelos de fenómenos ambientales, tratados en el Capítulo 5 también buscan hacer predicciones sobre la evolución posible de ciertas variables (población, nivel de mar, contenido atmosférico de CO_2 , etc.). Todos estos modelos usan derivadas, tasas de variación con el tiempo de las variables importantes.

Sin embargo, los fenómenos ambientales son en general fenómenos complejos. Para empezar las derivadas no son ecuaciones tan sencillas con las de velocidad o aceleración, y su resolución puede no ser trivial. Todos los modelos matemáticos ambientales (por ejemplo, los modelos meteorológicos) toman la forma de un conjunto de ecuaciones diferenciales que vinculan un número elevado de variables. Al resolver simultáneamente todas las ecuaciones, se obtienen las predicciones buscadas: cómo evolucionará la temperatura media superficial del planeta, o cómo evolucionará el nivel del mar, etc. En todas las ecuaciones aparecen parámetros que se ajustan para que el modelo reproduzca lo ocurrido en el

21. Esto es posible porque la fuerza gravitacional es proporcional a la masa, según las ecuaciones derivadas por Newton.

pasado reciente, con la esperanza que esos parámetros sigan siendo válidos en el futuro. Como es fácil advertir que la evolución futura depende mucho de algunos parámetros críticos, suelen aparecer los distintos escenarios, correspondientes a distintas selecciones de parámetros. Es así por ejemplo que las ecuaciones matemáticas usadas para predecir los cambios en la temperatura media global dependen críticamente de la cantidad de gases efecto invernadero que se liberan cada año a la atmósfera. Un escenario optimista preverá un drástico replazo de la generación eléctrica por quemado de combustibles fósiles, y un escenario pesimista preverá que se siga quemando petróleo a ritmos como los actuales.

Se puede decir que las ecuaciones de la Física Clásica (por ejemplo la Mecánica de Newton) son deterministas, mientras que las predicciones de los cambios ambientales son probabilísticas.

Al margen de las incertidumbres de los escenarios, existe otra característica que limita fuertemente la capacidad de hacer predicciones. En el acápite 3.6 vimos que el modelo de Lotka y Volterra estaba

formado por dos ecuaciones diferenciales con dos variables función del tiempo t . Cada una de las ecuaciones contenía un término donde se multiplicaban las dos variables x e y . Los sistemas más complejos de dinámica poblacional implican más variables, y por lo tanto más ecuaciones. Cuando hay términos no lineales (donde aparecen expresiones del tipo x^2 , xy , y^2 , xz , z^2 , yz para un sistema de tres especies) puede surgir el fenómeno matemático del caos. Imaginemos que queremos seguir la evolución de la población de tres especies, x , y y z en función del tiempo, a partir de una situación inicial dada, en la que conocemos aproximadamente los valores de cada población x_0 , y_0 y z_0 . Para ello resolveremos las ecuaciones diferenciales. La característica notable de este sistema, cuando es caótico, es que muy pequeñas variaciones en esos valores iniciales conducen a cambios drásticos en la evolución de las poblaciones. A veces alcanza con variaciones más pequeñas que el error con que podemos medir las poblaciones iniciales. Podremos hacer predicciones acotadas en el tiempo, pero a

tiempos más largos las posibles evoluciones de las poblaciones se separan mucho al variar casi nada los valores iniciales.

El mismo fenómeno es relevante en muchos otros campos. En particular, en meteorología es posible hacer predicciones solo dentro de un horizonte temporal acotado, porque nuestro conocimiento de las condiciones iniciales sigue siendo compatible con un abanico de trayectorias que divergen mucho a tiempos largos. Esta es la base matemática del efecto mariposa: El efecto mariposa fue propuesto por E.N. Lorenz (el mismo que vimos antes en este Capítulo), diciendo que podía bastar el aleteo de una mariposa para que la evolución del tiempo (clima) a largo plazo variara muchísimo.

6.8. Bibliografía

Blesa M.A., dos Santos Afonso M., Apella M.C. (2012). Agua y Ambiente. Un enfoque desde la Química. EUDEBA. ISBN: 9789502319575.

Código Alimentario Argentino (2007). Capítulo XII. Bebidas Hídricas, Agua y Aguas gasificadas. http://www.anmat.gov.ar/alimentos/codigoa/Capitulo_XII.pdf

Lawrence P., Meigh J., Sullivan C. (2003). *The Water Poverty Index: an International Comparison*. Keele Economic Research Papers 19.

New Economics Foundation (2012) *The Happy Planet Index: 2012 Report*.

Sullivan C.A., Meigh J.R., Giacomello A.M., Fediw T., Lawrence P., Samad M., Mlote S., Hutton C., Allan J.A., Schulze R.E., Dlamini D.J.M., Cosgrove W., Delli Priscoli J., Gleick P., Smout I., Cobbing J., Calow R., Hunt C., Hussain A., Acreman M.C., King J., Malomo S., Tate E.L., O'Regan D., Milner S., Stey I. (2003), *The Water Poverty Index: Development and application at the community scale*. *Natural Resources Forum* 27, 189–199.

World Health Organization (2009). *Cyanide in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. WHO/HSE/WSH/09.01/.

Young H.D. (1962) *Statistical Treatment of Experimental Data*. McGraw Hill.

7. ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1-1. Tiempos de residencia del agua en distintos reservorios	11
Tabla 1-2. Energía puesta en juego en algunos acontecimientos extremos	21
Tabla 1-3. Número anual de eventos extremos y de muertes asociadas, ordenados por décadas y por regiones	21
Tabla 1-4. Algunos números sobre el planeta Tierra	22

Capítulo 2

Tabla 2-1. Aniones y cationes comunes, y sus sales	33
Tabla 2-2. Algunos ácidos comunes	39
Tabla 2-3. Algunas bases comunes	39
Tabla 2-4. Unidades de concentración cuando la cantidad del soluto está dada en algún múltiplo de gramos	42
Tabla 2.5. Composición del aire seco	43
Tabla 2-6. Valores de Global Warming Potential (GWP) referidos al dióxido de carbono	46
Tabla 2-7. Interpretación de los valores de AQI (Aire Quality Index) en función de su impacto en la salud	47
Tabla 2-8. Parámetros, unidades de medida y factores de peso en el WQI	48
Tabla 2-9. Cálculo de las funciones subíndice a partir de los valores medidos, y valor final del WQI	49
Tabla 2-10. Descriptores y colores propuestos para presentar el índice general WQI	49
Tabla 2-11. Valoración Porcentual (ci) de diez de los Parámetros fisicoquímicos y biológicos utilizados por Martínez de Bascarán	50
Tabla 2-12. Valoración Porcentual (ci) de trece de los Parámetros fisicoquímicos y biológicos utilizados por Martínez de Bascarán	50
Tabla 2-13. Categorías de Calidad de Agua según Martínez de Bascarán	51
Tabla 2-14. Clases agrológicas	53

Capítulo 4

Tabla 4-1. Historia ambiental del DDT	74
---------------------------------------	----

Capítulo 5

Tabla 5-1. Las cuatro grandes enfermedades ambientales de Japón	93
---	----

Tabla 5-2. Algunos casos notables de envenenamiento por contaminación de alimentos con plaguicidas	93
Tabla 5-3. Pandemias de Cólera	99
Tabla 5.5	100
Tabla 5-5. Enfermedades más frecuentes asociados con la contaminación biológica del agua	101

Capítulo 6

Tabla 6-1. Ejemplo imaginario de dos series de mediciones que arrojan el mismo promedio pero tienen dispersiones diferentes	109
Tabla 6-2. Valores de la desviación estándar para los ejemplos de la Tabla 6-1	109

8. ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1-1	3
Figura 1-2	3
Figura 1-3	4
Figura 1-4	5
Figura 1-5 (a)	5
Figura 1-5 b)	6
Figura 1-6	6
Figura 1-7	7
Figura 1-8	8
Figura 1-9	8
Figura 1-10	9
Figura 1-11	9
Figura 1-12	9
Figura 1-13	10
Figura 1-14	10
Figura 1-15	11
Figura 1-16	11
Figura 1-17	12
Figura 1-18	12
Figura 1-19	14
Figura 1-20	14
Figura 1-21	14
Figura 1-22	15
Figura 1-23	16
Figura 1-24	16
Figura 1-25	16
Figura 1-26	17
Figura 1-27	18
Figura 1-28	18
Figura 1-29	19
Figura 1-30	21

Capítulo 2

Figura 2-1	24
Figura 2-2	25
Figura 2-3	26
Figura 2-4	27
Figura 2-5	27
Figura 2-6	27
Figura 2-8	27
Figura 2-7	27
Figura 2-9	29

Figura 2-10	30
Figura 2-11	31
Figura 2-12	33
Figura 2-13	34
Figura 2-14	34
Figura 2-15(b)	36
Figura 2-16	36
Figura 2-17	37
Figura 2-15(a)	38
Figura 2-19	41
Figura 2-18	42
Figura 2-19	44
Figura 2-20	45
Figura 2-21	45
Figura 2-22	45
Figura 2-22	48

Capítulo 3

Figura 3-1	55
Figura 3-2	56
Figura 3-3	57
Figura 3-4	57
Figura 3-5	57
Figura 3-6	58
Figura 3-7	58
Figura 3-8	59
Figura 3-9	59
Figura 3-10	59
Figura 3-11	60
Figura 3-12	60
Figura 3-13	61
Figura 3-14	61
Figura 3-15	62
Figura 3-16	63
Figura 3-17	63
Figura 3-18	63
Figura 3-19	64
Figura 3-20	65
Figura 3-21	65
Figura 3-22	65
Figura 3-23	66
Figura 3-24	66
Figura 3-25	67
Figura 3-26	68

Capítulo 4

Figura 4-1	69
Figura 4-2	69
Figura 4-3	69
Figura 4-4	70
Figura 4-5	70
Figura 4-6	71
Figura 4-7	71
Figura 4-8	71
Figura 4-9	72
Figura 4-10	73
Figura 4-11	73
Figura 4-12	74
Figura 4-13	75
Figura 4-14	75
Figura 4-15	75
Figura 4-16	77
Figura 4-17	77
Figura 4-18	78
Figura 4-19	78
Figura 4-20	78
Figura 4-21	79
Figura 4-22	80
Figura 4-23	80
Figura 4-24	81
Figura 4-25	81
Figura 4-26	82
Figura 4-27	82
Figura 4-28	83
Figura 4-29	83
Figura 4-30	83
Figura 4-31	84
Figura 4-32	84
Figura 4-33	84
Figura 4-34	85
Figura 4-35	86
Figura 4-36	86
Figura 4-37	86
Figura 4-38	87
Figura 4-39	88
Figura 4-40	88
Figura 4-41	88

Capítulo 5

Figura 5-1	91
Figura 5-2	91
Figura 5-3	93
Figura 5-4	96
Figura 5-5	97
Figura 5-6	98
Figura 5-7	99
Figura 5-8	99
Figura 5-9	100
Figura 5-10	101
Figura 5-11	101
Figura 5-12	103
Figura 5-13	103
Figura 5-14	104
Figura 5-15	104
Figura 5-16	105

Capítulo 6

Figura 6-1	106
Figura 6-2	106
Figura 6-3	106
Figura 6-4	106
Figura 6-5	107
Figura 6-6	107
Figura 6-7	107
Figura 6-8	108
Figura 6-9	108
Figura 6-10	108
Figura 6-11	109
Figura 6-12	109
Figura 6-13	110
Figura 6-14	110
Figura 6-15	110
Figura 6-16	112
Figura 6-17	113
Figura 6-18	113
Figura 6-19	114
Figura 6-20	115
Figura 6-21	116

9. ÍNDICE DE CUADROS

Capítulo 1

Cuadro 1-1	7
Cuadro 1-2	7
Cuadro 1-3	7
Cuadro 1-4	13
Cuadro 1-5	13
Cuadro 1-6	15
Cuadro 1-7	18
Cuadro 1-8	19

Capítulo 2

Cuadro 2-1	23
Cuadro 2-2	23
Cuadro 2-3	25
Cuadro 2-4	26
Cuadro 2-5	26
Cuadro 2-6	27
Cuadro 2-7	28
Cuadro 2-8	30
Cuadro 2-9	31
Cuadro 2-10	32
Cuadro 2-11	33
Cuadro 2-12	33
Cuadro 2-13	34
Cuadro 2-14	35
Cuadro 2-15	37
Cuadro 2-16	38
Cuadro 2-17	39

Capítulo 3

Cuadro 3-1	60
Cuadro 3-2	63
Cuadro 3-3	64
Cuadro 3-4	67

Capítulo 4

Cuadro 4-1	75
Cuadro 4-4	81
Cuadro 4-3	84

Capítulo 5

Cuadro 5-1	90
Cuadro 5-2	91
Cuadro 5-3	92
Cuadro 5-4	93
Cuadro 5-5	95
Cuadro 5-6	95
Cuadro 5-7	97
Cuadro 5-8	98
Cuadro 5-9	99
Cuadro 5-10	99
Cuadro 5-11	103
Cuadro 5-12	104
Cuadro 5-13	104