



## Editorial

El año 2008 ha sido dedicado al planeta Tierra con el lema "Ciencias de la Tierra para la sociedad". Con ello, la asamblea general de las Naciones Unidas quiere contribuir al desarrollo sustentable de la

Tierra, promoviendo el uso inteligente de los recursos naturales y una mejor planeación de las actividades humanas relacionadas con la naturaleza, de modo que disminuyan los riesgos para la sociedad. Esta es una ocasión para destinar algunos esfuerzos adicionales para dar a conocer a la sociedad cómo es la Tierra, cómo ha ido evolucionando en el tiempo hasta ser lo que nosotros conocemos ahora, y cómo está cambiando actualmente a través de su interacción con el hombre.

En efecto, desde su origen, el ser humano, como todos los seres vivos, obtuvo de la Tierra cuanto necesitó para desarrollar su vida, y la Tierra le pareció inmutable, sus recursos no tenían fin. En cambio, con el desarrollo de las grandes civilizaciones y más particularmente en los últimos 150 años, después de la revolución industrial, el ritmo de extracción de recursos y de alteración del medio ambiente del planeta por parte del hombre se aceleró. En las últimas décadas, estamos viviendo, entre otros, la destrucción de los bosques, la contaminación de ríos y mares, la pérdida de biodiversidad, los deslizamientos de laderas y las inundaciones de los cauces de los ríos, y empezamos a tomar conciencia de que la Tierra no es inmutable, sino que reacciona, como todo cuerpo ante una acción. Es más, los efectos de la acción del hombre llegan a ser remotos, en zonas no habitadas, como los casquetes polares que se funden y liberan icebergs al océano, o la tundra que al deshelarse, despidе grandes cantidades de metano a la atmósfera. La intensidad de todos estos efectos ha desencadenado una señal de alerta en la comunidad internacional.

El año internacional del planeta Tierra tiene así como uno de sus objetivos ratificar la importancia de la investigación científica en torno al tema de la Tierra, como un medio para conocer el planeta y su dinámica, para poder entender su funcionamiento y así lograr un equilibrio sostenible con la actividad humana. La investigación está enfocada a las geociencias, pero

también a la biología, o las ciencias del mar y de la atmósfera, pues la Tierra es un sistema complejo formado por subsistemas (geológico, biológico, hidrológico, atmosférico) que están tan íntimamente ligados e interactúan de tal manera que los cambios ocurridos en un subsistema inciden en el comportamiento de los demás, y es esta compleja interacción la que determina las pautas de la evolución del planeta. Así la biodiversidad depende de la geología, la hidrología y la atmósfera, pero también la composición de la atmósfera, la hidrología y el clima dependen de los organismos vivos que existen y de su fisiología. Pero todos ellos dependen a su vez de la historia de la Tierra, de los cambios geológicos, atmosféricos y de los organismos vivos que se han sucedido de manera muy dinámica a lo largo de más de cuatro mil millones de años, y que explican la evolución actual y los parámetros que hoy podemos medir y analizar.

Con este volumen especial de Nuestra Tierra queremos compartir con ustedes tres trabajos de síntesis general sobre algunos subsistemas de la Tierra: la Litósfera, la Hidrósfera y la Biósfera, y tres trabajos más de detalle relacionados con la atmósfera e hidrósfera (inundaciones) y la biósfera (plantas y animales).

M. Cristina Peñalba  
Editora

### Contenido

Editorial .....	2
La litósfera (García Barragán, J.C.) .....	3
La hidrósfera (Ortega-Rivera, M. A.) .....	15
La biósfera: diversidad biológica de nuestro planeta (Molina Freaner, F.) .....	25
Las inundaciones históricas de la ciudad de Guanajuato (Miranda-Avilés, R. et al.) .....	33
Las plantas del género <i>Ipomoea</i> en Sonora: características y usos (Quintana Vásquez, M.A.) .....	36
El carpintero imperial ( <i>Campephilus imperialis</i> ) (Molina Freaner, F.) .....	38

Portada. Imagen del Centro de vuelo espacial Goddard de la NASA, obtenida por Reto Stöckli, que muestra el planeta Tierra, y en la que se distinguen particularmente Norte y Centroamérica. La información contenida en esta imagen fue obtenida con un espectrorradiómetro MODIS instalado a bordo del satélite Terra que gira alrededor de la Tierra a una distancia de 700 km de su superficie.  
[http://visibleearth.nasa.gov/view\\_rec.php?id=2429](http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=2429).

## Directorio

UNAM

Dr. José Narro Robles  
Rector

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro  
Secretario General

Mtro. Juan José Pérez Castañeda  
Secretario Administrativo

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz  
Coordinador de la Investigación Científica

Dr. Gustavo Tolson Jones  
Director del Instituto de Geología

Dr. César Domínguez Pérez Tejada  
Director del Instituto de Ecología

Dr. Thierry Calmus  
Jefe de la Estación Regional del Noroeste

### NUESTRA TIERRA

Dra. Ma. Cristina Peñalba  
Editora

Dr. César Jacques Ayala  
Dr. Martín Valencia Moreno  
Editores Asociados

Dr. Hannes Löser  
Editor Técnico y Diseño

Nuestra Tierra es una publicación de la Estación Regional del Noroeste, institutos de Geología y Ecología, que aparece semestralmente en primavera y otoño de cada año.

Estación Regional del Noroeste  
Blvd. L. D. Colosio s/n y Madrid  
Campus UniSon

83000 Hermosillo, Sonora, México  
Tel. (662) 217-5019, Fax (662) 217-5340

[nuestratierra@geologia.unam.mx](mailto:nuestratierra@geologia.unam.mx)

<http://www.geologia-son.unam.mx/nt.htm>

ISSN 1665-945X

Impresión: 500 ejemplares

Precio: \$ 30.00

En caso de utilizar algún contenido de esta publicación, por favor citar la fuente de origen. El contenido de los trabajos queda bajo la responsabilidad de los autores.

## La Tierra: Geología

### La litósfera

#### El Interior de la Tierra

Las únicas rocas que un geólogo puede estudiar directamente en su sitio son las que pertenecen a la corteza terrestre y que no han experimentado desplazamientos o grandes deformaciones. La corteza terrestre es una capa delgada de roca que constituye menos del 1 % del volumen total de la Tierra (Figura 1). Se pueden extraer muestras de roca de una mina o de un pozo para ser estudiadas. De hecho, los geólogos no pueden tomar muestras de rocas a mucha profundidad. Algunas minas profundas penetran 3 km por debajo de la superficie de la Tierra, y un pozo petrolero profundo puede alcanzar los 8 km; el pozo más profundo, con objetivos puramente científicos, alcanzó 12 km en Rusia. Debido a que la Tierra tiene un radio de 6370 km, es obvio que los geólogos pueden apenas rasguñar la superficie cuando tratan de estudiar directamente las rocas debajo de sus pies.

Para poder conocer el interior de la Tierra, los geólogos utilizan una rama de la Geología llamada Geofísica, la cual es la aplicación de las leyes y principios de la Física al estudio de la Tierra. La Geofísica incluye el estudio de las ondas sísmicas, el campo magnético, las propiedades eléctricas, la gravedad y el flujo del calor interno, entre otros atributos de la Tierra. Todos estos estudios nos dicen cómo es la Tierra en sus partes más profundas y nos ayudan a poder configurar su estructura interna. A continuación se presenta una descripción de la misma, gracias a la aplicación de estos métodos.

El estudio de la refracción y reflexión sísmica permitió a los científicos definir las tres zonas principales que componen el interior de la Tierra. La corteza es la capa de roca exterior, la cual forma la cubierta delgada sobre la superficie de la Tierra. Debajo de la corteza se encuentra el manto, un caparazón grueso de roca que separa la corteza arriba del núcleo abajo. El límite que separa la corteza del manto se llama discontinuidad de Mohorovičić. El núcleo es la zona central de la Tierra; probablemente es metálico y la causa del campo magnético de la Tierra (Figura 1).

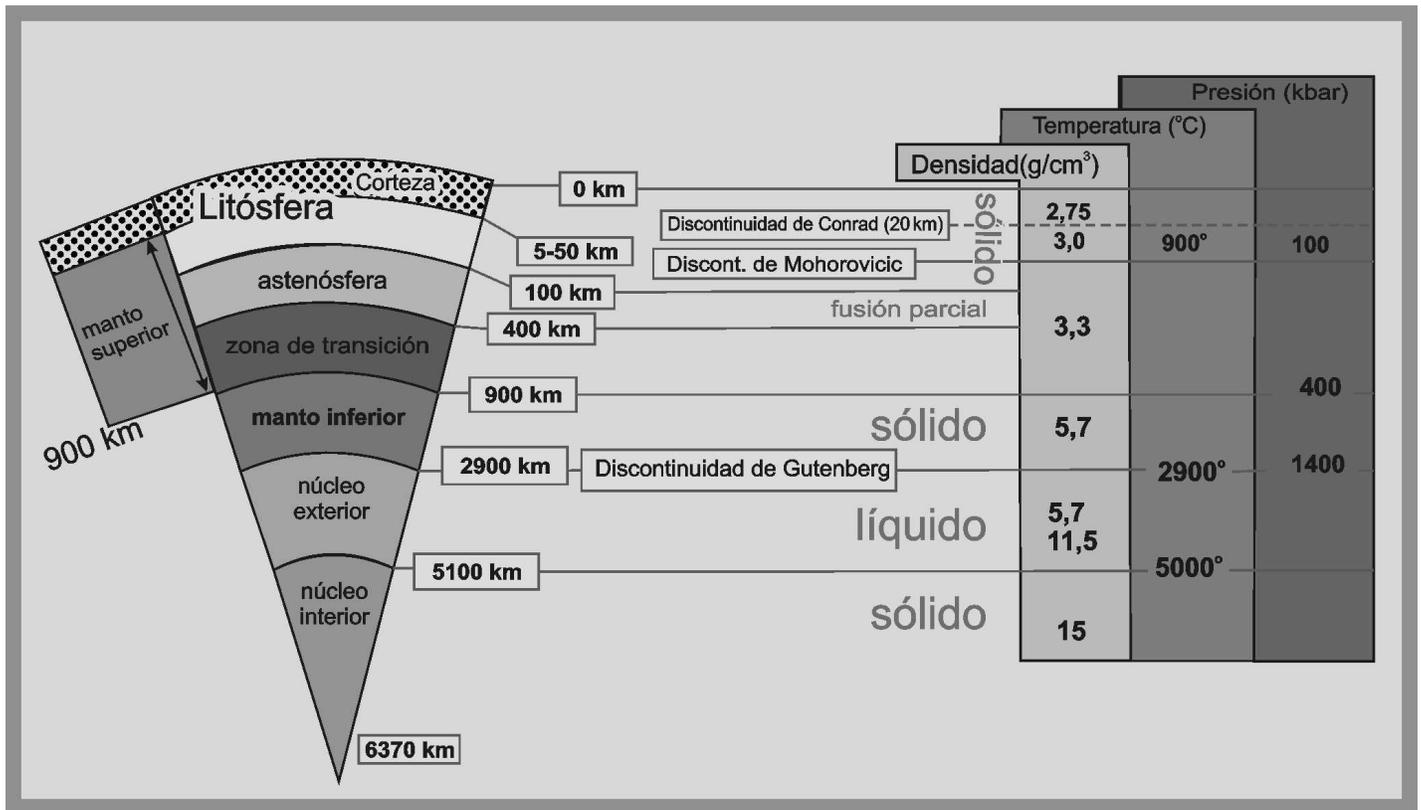


Figura 1. Estructura general del interior de la Tierra (Figura tomada de <http://plata.uda.cl/minas/apuntes/geologia/geologiageneral/ggcap01b.htm>)

Esta es una división que fue aceptada por mucho tiempo por la mayoría de los científicos. Sin embargo, estudios de geofísica y geología realizados un poco antes de que terminara la Segunda Guerra Mundial, principalmente en el Océano Pacífico, dieron origen a la teoría conocida como tectónica de placas, la cual ha demostrado que la corteza y la parte más superior del manto pueden ser más apropiadamente divididos en una litósfera frágil y una astenósfera plástica o dúctil.

### Definición de Litósfera

El término litósfera fue acuñado originalmente por Joseph Barrell en 1914 para referirse a la capa más exterior, mecánicamente más rígida de la Tierra, que es capaz de soportar enormes cargas superficiales, tales como los volcanes. Las raíces de esta palabra vienen del griego, *lithós*, roca, y *sphaira*, esfera, términos que se combinan para denotar la esfera o caparazón de roca de la Tierra. En contraste, astenósfera significa "esfera débil". El concepto cobró mucha importancia al final de la década de 1960 cuando las teorías de la expansión del piso oceánico y la deriva de los continentes fueron combinados bajo el paradigma de la tectónica de placas. Este paradigma explica la

actividad geológica en la superficie de la Tierra como consecuencia de la interacción a lo largo de los límites de un número determinado de placas litosféricas que se desplazan lateralmente unas con respecto a las otras.

Mientras que la corteza, el manto y el núcleo de la Tierra se pueden diferenciar por cambios fundamentales en la composición química y mineralógica de las rocas, la litósfera difiere de la astenósfera subyacente principalmente en función de la temperatura y la presión, o lo que es lo mismo, por su respuesta a los esfuerzos de deformación. Debido a que la viscosidad del manto de la Tierra depende fuertemente de la temperatura, la litósfera, en los 100 km superiores del manto, es altamente viscosa y resistente a la deformación comparada con la astenósfera que es más dúctil y de menor viscosidad.

La litósfera normalmente se clasifica como oceánica o continental, dependiendo de si su capa superficial consiste de corteza oceánica delgada (~6 km) y densa (~2800 kg/m<sup>3</sup>) o si consiste de una corteza continental más gruesa (~40 km) y más ligera (~2700 kg/m<sup>3</sup>; Tabla 1). Las rocas de cualquier clase pierden resistencia y se vuelven fácilmente deformables a una temperatura de 1300°C y a la presión que se alcanza a 100 km de pro-

fundidad, que puede ser equivalente a aproximadamente 2 MPa (1 MPa = 1 megapascal = 1 kbar). Esta es la base de la litósfera debajo de los océanos, o como se le llama más coloquialmente, la litósfera oceánica. La base de la litósfera continental, en contraste, se encuentra a alrededor de 200 km de profundidad. La razón de esta diferencia entre los dos tipos de litósfera son gradientes geotérmicos diferentes.

El gradiente geotérmico es la proporción a la cual la temperatura se incrementa con la profundidad. En la litósfera no es constante en todos los lugares; varía de lugar a lugar, debido en parte a que las propiedades térmicas de las rocas difieren; otras diferencias surgen debido al volcanismo u otros efectos caloríficos locales (Figura 2).

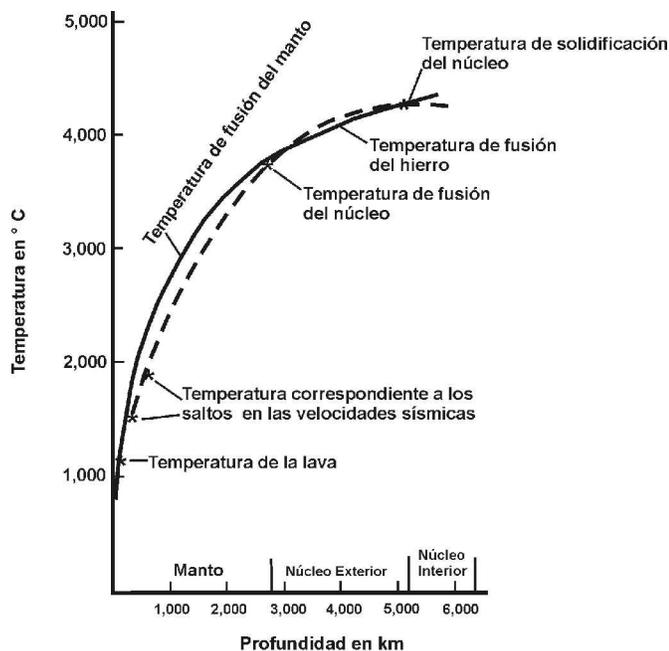


Figura 2. Variación de la temperatura con la profundidad en el interior de la Tierra (Figura tomada de [http://www.jovenclub.cu/libros/libros\\_2/ciencia3/074/htm/sec\\_11.htm](http://www.jovenclub.cu/libros/libros_2/ciencia3/074/htm/sec_11.htm)).

Las diferencias más grandes e importantes, sin embargo, son el resultado de los espesores variables de la litósfera oceánica y de la litósfera continental.

Debido a que las rocas en la litósfera son demasiado rígidas, el calor se transmite principalmente a través de la litósfera por conducción. Sin embargo, la conducción es un proceso lento, de forma que los gradientes térmicos en la litósfera son pronunciados; esto es, las temperaturas cambian rápidamente con la profundidad. La temperatura en la base de la litósfera -el límite entre la litósfera y la astenósfera- varía desde cerca de 1300°C debajo de los océanos hasta 1350°C debajo de los continentes.

En una primera estimación, la temperatura en la cima de la litósfera es cercana a los 0°C. Debido a que la litósfera oceánica tiene cerca de 100 km de espesor, el promedio del gradiente geotérmico en la litósfera oceánica es de 1300°C/100 km, o de 13°C/km. En contraste, la litósfera continental tiene casi 200 km de espesor, de modo que el promedio del gradiente geotérmico en la litósfera continental es casi de 1350°C/200 km, o de 6.7°C/km.

Características	Corteza Oceánica	Corteza Continental
Promedio de espesor	7 km	30 a 50 km (espesor bajo las montañas)
Velocidad de la onda sísmica primaria (P)	7 km/s	6 km/s
Densidad	3 g/cm <sup>3</sup>	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Composición probable	Basalto cubriendo a gabro	Granito, otras rocas plutónicas, esquisto, gneiss con cubierta sedimentaria

Tabla 1. Características de la corteza oceánica y de la corteza continental

### Espesor de la litósfera oceánica

La litósfera oceánica, que se puede definir como el escudo exterior de la Tierra, tiene un gradiente de temperatura conductiva que sobreyace el interior adiabático convectivo. Éste se conoce como la litósfera térmica, y su espesor está controlado por el enfriamiento. Así, la astenósfera puede ser convertida en litósfera oceánica simplemente por enfriamiento. El engrosamiento progresivo de la litósfera oceánica debajo del Pacífico ocurrió hace 70 millones de años más o menos, y después permaneció relativamente constante en espesor hasta la subducción (Figura 3). La erosión convectiva en la base de la litósfera oceánica puede ser la responsable del mantenimiento de esta profundidad constante. El espesor de la parte rígida de la capa exterior de la Tierra que fácilmente se hunde bajo una carga, conocida como litósfera elástica, es menor que el de la litósfera térmica. La base de la litósfera oceánica elástica varía con la composición y la temperatura, incrementándose desde 2 km aproximadamente en las crestas oceánicas hasta 50 km en el límite previo a la subducción. Esta corresponde burdamente con la isoterma de 500-600°C. En la litósfera continental el espesor elástico es inferior al espesor de la corteza, frecuentemente por 10 a 15 km.

## Tipos de movimiento entre placas tectónicas

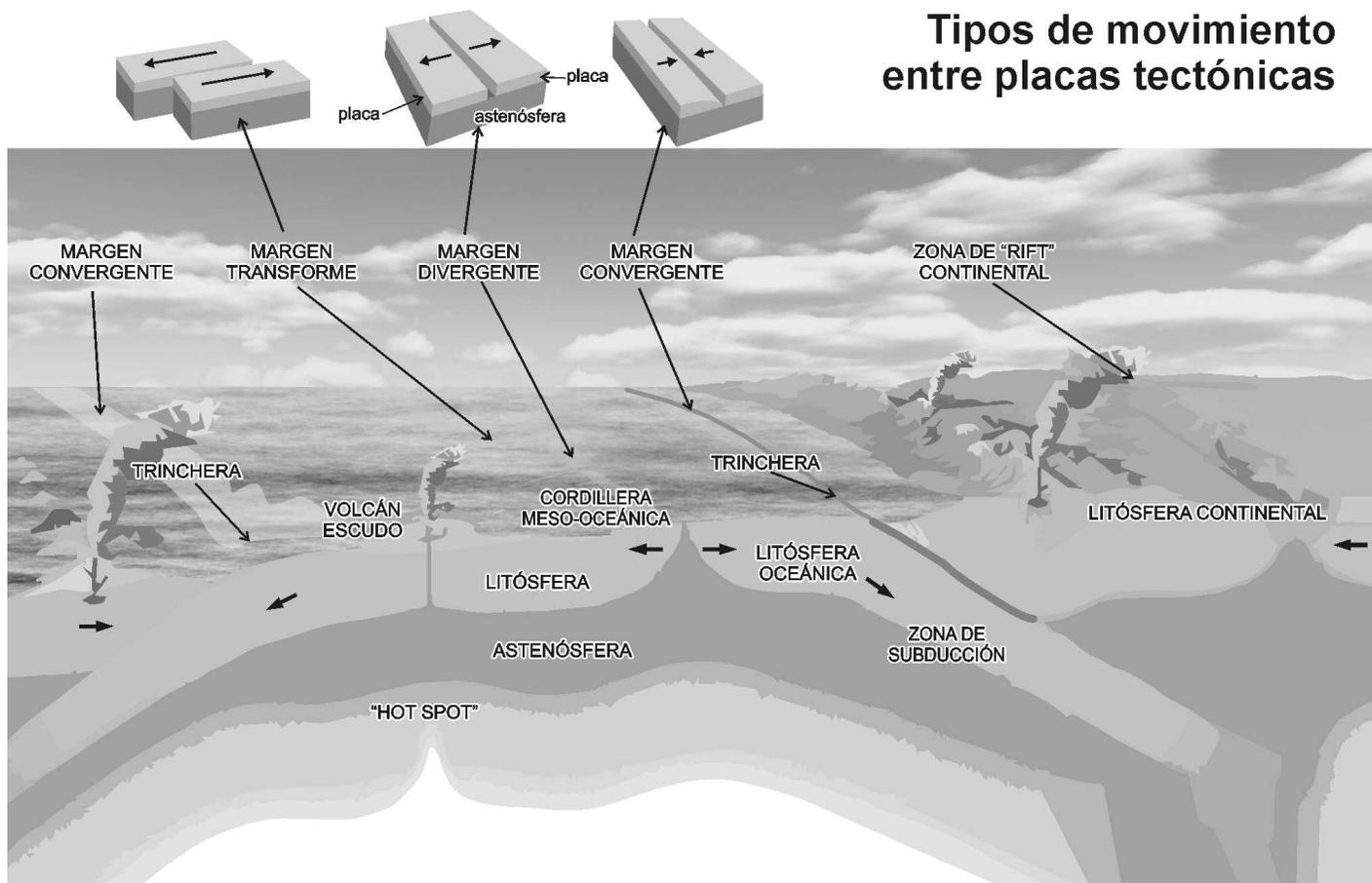


Figura 3. Corte esquemático de la Tierra mostrando la litósfera oceánica, la litósfera continental y zonas de subducción (Imagen tomada de la página electrónica del Servicio Geológico de los Estados Unidos: <http://pubs.usgs.gov/dynamic/Vigil.html>).

### Espesor de la litósfera continental

La litósfera continental térmica varía considerablemente en espesor dependiendo de su edad y del mecanismo de su formación. Estudios tomográficos del manto superior han sido definitivos para estimar el espesor de la litósfera continental. La mayor parte de la litósfera que se formó desde hace 2500 millones de años, tiene entre 100 y 200 km de espesor, mientras que la litósfera debajo de los escudos del Arqueozoico (antes de 2500 millones de años) tiene comúnmente 300 km de espesor.

La base de la litósfera en el norte de Canadá, en África central y meridional, y en Antártica, regiones que están cubiertas por corteza del Arqueozoico, puede casi alcanzar los 410 km. Sin embargo, bajo los escudos del Proterozoico (entre 2500 y 542 millones de años), los espesores de la litósfera raramente sobrepasan los 200 km.

El grueso espesor de la litósfera del Arqueozoico no ayuda o, por lo menos, entorpece el movimiento de las

placas. En contraste, los "puntos calientes" (*hot spots*), tales como Hawaii e Islandia, están asociados con velocidades lentas de ondas sísmicas entre 50 y 200 km de profundidad. Estas anomalías de lenta velocidad son claramente diferentes de las que están asociadas con las crestas oceánicas (Figura 3), las cuales profundizan a no más de 100 km. Esta característica apoya el punto de vista de que el manto pasivo ascendente es responsable de las crestas oceánicas, mientras que el manto activo ascendente forma puntos calientes. El modelado térmico y geoquímico ha mostrado que la litósfera pudo haber sido adelgazada hasta los 50 km en zonas de extensión, las cuales promueven el ascenso de las llamadas "plumas de manto" (*mantle plumes*).

Los datos isotópicos y geoquímicos de xenolitos (fragmentos de roca embebidos en rocas ígneas de distinta composición) del manto indican que la litósfera debajo de los escudos del Arqueozoico se formó durante el mismo Arqueozoico y que es químicamente diferente de la litósfera del post-Arqueozoico.

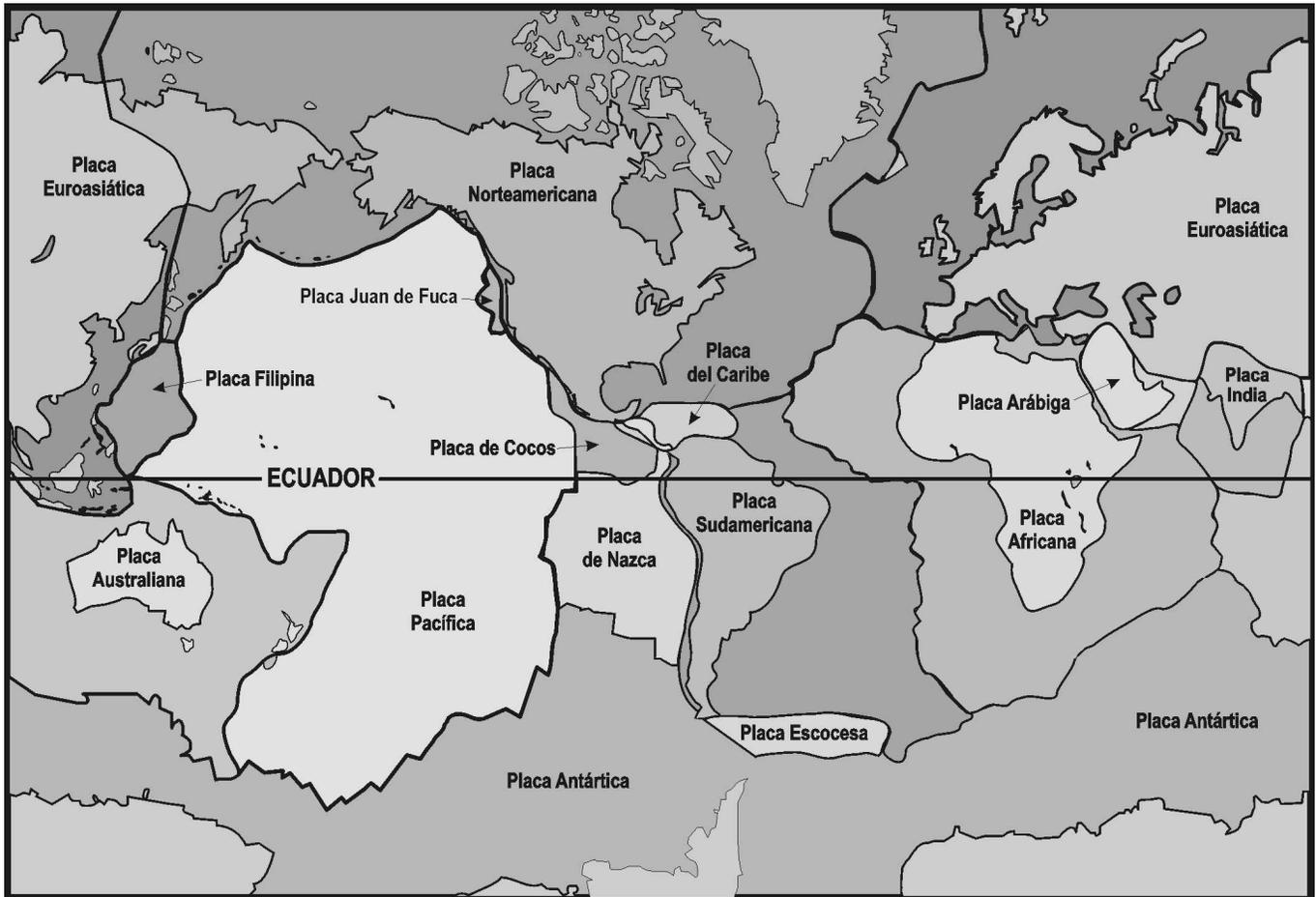


Figura 4. Mapa de placas tectónicas (Imagen tomada de la página electrónica de Wikipedia: [http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Tectonic\\_plates.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Tectonic_plates.png)).

## La Tectónica de Placas

La litósfera no es una capa continua, sino que está compuesta de varios fragmentos llamadas placas, las cuales tienen superficies de cientos de miles o millones de kilómetros cuadrados (Figura 4). El calor interno de la Tierra se manifiesta como un movimiento de convección, el cual a su vez mueve las placas de la litósfera y cambia la superficie de la Tierra. Montañas como los Alpes, la Sierra Madre Oriental o los Himalaya, que parece que nunca cambian, son tan solo estados temporales de la superficie de la Tierra, desde el punto de vista de la escala geológica del tiempo (Figura 5). Las cadenas montañosas crecen cuando las placas de la litósfera activa chocan y empujan hacia arriba masas de rocas plegadas y deformadas; entonces, estas cadenas montañosas son lentamente erosionadas, dejando solo las raíces que registran colisiones antiguas.

Una historia interesante que ha surgido de los estudios geológicos de la Tierra es que los continentes mismos se mueven lentamente. Se desplazan a tasas de

hasta 12 cm/año, algunas veces chocando unos contra otros y originando nuevas cadenas de montañas por colisión, y otras veces separándose para formar nuevas cuencas oceánicas. Los Himalaya son montañas jóvenes, geológicamente hablando, que empezaron a formarse cuando el subcontinente de la India chocó contra Asia hace cerca de 45 millones de años. El Mar Rojo es un océano joven que empezó a formarse hace unos 30 millones de años cuando se separó la Península Arábiga de África (Figura 6).

Pero no son solo los continentes los que se mueven, sino la litósfera. Los continentes, las cuencas oceánicas y todo lo demás en la superficie de la Tierra se mueven como si fueran pasajeros de grandes balsas; estas balsas son placas gigantes que flotan sobre la astenósfera. Como resultado directo o indirecto de la deriva de la litósfera sobre la astenósfera, todos los rasgos importantes de la superficie de la Tierra, ya sea que estén sumergidos debajo de los océanos o expuestos en los continentes, se elevan. Tales movimientos implican eventos complejos, tanto expuestos como ocultos, los cuales se agrupan en un término llamado tectónica.



*Figura 5. Imagen satelital de los Montes Zagros en Irán, Asia. El choque de la placa Africana contra la placa Euroasiática originó una serie de plegamientos en la corteza terrestre llamados anticlinales y sinclinales. Estos plegamientos formaron la cadena montañosa más larga de Irak y la segunda de Irán. Se extiende a lo largo de 1500 km desde el Kurdistán iraquí hasta el Golfo Pérsico (Imagen tomada de la página electrónica de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/earthasart/iran.html>).*

La palabra tectónica se deriva del griego *tektón* que significa carpintero o constructor. La tectónica es, entonces, el estudio del movimiento y deformación de la litósfera. La rama de la tectónica que tiene que ver con los procesos por medio de los cuales las placas se mueven lateralmente sobre la astenósfera se llama tectónica de placas.

La litósfera está compuesta por seis grandes placas y algunas otras placas menores (Figura 4), todas moviéndose a velocidades que varían entre 1 y 12 cm por año. Cuando una placa se mueve, todo se mueve con ella. Si la placa está coronada parcialmente por corteza oceánica y parcialmente por corteza continental, entonces tanto el piso oceánico como el continente se mueven con la misma velocidad y en la misma dirección.

La hipótesis de que el piso oceánico podría estarse moviendo fue propuesta por primera vez a principios de los años 1960, y fue una de las claves que condujeron a la teoría de la tectónica de placas en 1967. En cambio, la sugerencia de que los continentes se mue-

ven data de principios del siglo XX: el meteorólogo y científico alemán Alfred L. Wegener propuso esta idea cuando encontró que rasgos geológicos a gran escala en continentes separados a menudo coincidían muy cercanamente cuando los continentes se juntaban. Wegener también descubrió que los fósiles encontrados en un determinado lugar a menudo indicaban un clima completamente diferente del clima actual: por ejemplo, los fósiles de plantas tropicales, tales como helechos y cicadáceas que actualmente se encuentran en la isla ártica de Spitsbergen. Todos estos hechos apoyaron la teoría de Wegener de "la deriva de los continentes", que expuso por primera vez en 1912 y que desarrolló de forma más detallada en su tratado de 1915 "El origen de los continentes y los océanos". Wegener propuso que hace unos 300 millones de años, los continentes formaban una sola masa llamada Pangea (del griego, que significa "todo Tierra"), rodeada por un vasto océano llamado Panthalassa. Pangea se había roto o separado en fragmentos que se habían alejado unos de otros desde entonces. Esto se llamó deriva de los continentes.

La sugerencia original para la deriva de los continentes fue que éstos deberían, de alguna forma, deslizarse a través del piso oceánico. Sin embargo, los científicos de esa época pronto se dieron cuenta de que la fricción impediría los movimientos de esa naturaleza. Las rocas en el piso oceánico son demasiado rígidas y fuertes como para que los continentes se deslicen sobre ellas.

Eventualmente y siguiendo al descubrimiento de que la corteza oceánica también se mueve, y de que la astenósfera es débil y fácilmente se deforma, los geólogos se dieron cuenta de que la litósfera completa debería moverse y no solo los continentes, y que las placas de litósfera dura deberían de deslizarse sobre la astenósfera plástica. La primera evidencia clara de que el piso oceánico y el continente sobre la misma placa litosférica se mueven a la misma velocidad y en la misma dirección, provino del estudio de las propiedades magnéticas de las rocas. Sin embargo, una serie de mediciones recientes han aportado evidencias notables que son más que convincentes. La nueva evidencia del movimiento de las placas proviene de los satélites. Utilizando rayos láser emitidos por satélites, se puede medir la distancia entre dos puntos sobre la Tierra con una exactitud de aproximadamente 1 cm. Realizando estas mediciones varias veces en un año, se puede calcular directamente las velocidades de las placas en

el presente. Estas mediciones se han comparado con las estimadas a partir del magnetismo y han coincidido en gran medida. Esta coincidencia implica que las placas se mueven uniforme y continuamente, en lugar de hacerlo de forma intermitente.

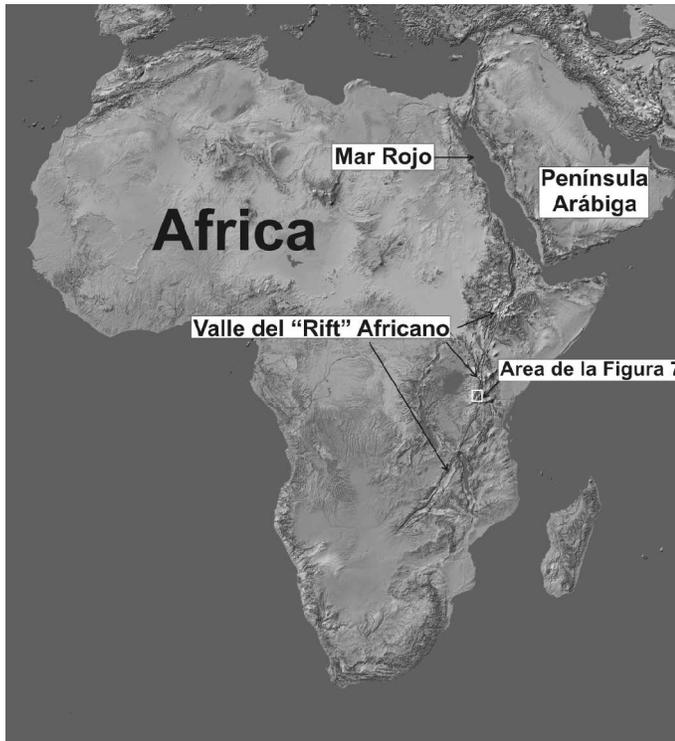


Figura 6. El continente africano. Esta imagen satelital compuesta muestra en su parte superior derecha la "cicatriz" dejada por la separación de la Península Arábiga de África hace aproximadamente 30 millones de años, y que es actualmente el Mar Rojo. El inicio de una separación de Etiopía, Somalia, Kenia y Tanzania de África está señalado por el extenso Valle del "rift" Africano (Imagen tomada de la página electrónica de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA04965>).

## Movimientos de las placas

Las placas se mueven como unidades individuales y las interacciones entre las placas ocurren a lo largo de sus bordes. Las interacciones entre las placas se expresan distintivamente por medio de los terremotos y el volcanismo, ya que estos dos fenómenos ocurren en las márgenes de las placas. Las placas tienen tres tipos de márgenes: Márgenes Divergentes, Márgenes Convergentes y Márgenes Transformes (Figura 3).

### 1. Márgenes Divergentes

Las Márgenes Divergentes son también llamadas ejes de expansión porque tales márgenes son fracturas

en la litósfera donde dos placas se separan. Cada placa se separa del eje de expansión exactamente como si fuera una banda que se levanta desde la fractura del manto. Una similitud aproximada, que se usa para ilustrar cómo funcionan los ejes de expansión, es la comparación con una banda transportadora. Aunque es más ancha e irregular que una de éstas, una placa litosférica actúa como la parte superior de una banda que se mueve continuamente. La analogía es solo parcialmente correcta porque la placa no se eleva como una cinta sólida. Está siendo creada por la formación de nueva corteza a lo largo de la fractura. Otra diferencia en la posible analogía es que las dos placas se mueven en direcciones opuestas.

Cuando un margen divergente ocurre en la corteza oceánica coincide con una cordillera meso-oceánica. No podemos ver el manto debajo de las cordilleras meso-oceánicas, aunque es posible inferir lo que sucederá. Las corrientes de convección acarrearán roca en estado incandescente desde la parte más profunda del manto, y como resultado el límite entre la litósfera y la astenósfera se aproxima mucho al piso oceánico y porciones locales de la astenósfera llegan a estar lo suficientemente calientes como para iniciar la fusión. La roca fundida es magma. El magma que se forma en la astenósfera debajo de las cordilleras meso-oceánicas se eleva hasta la parte superior de la litósfera, donde se enfría y endurece para formar nueva corteza oceánica.

Cuando un eje de expansión ocurre en corteza continental, sucede una secuencia interesante de eventos. Primero se forma una gran zona de fallamiento normal de alto ángulo llamada por los geólogos zona de *rift*. Un ejemplo de este fallamiento es el que ocurre desde Etiopía hasta Kenia, Tanzania y Malawi, llamado Valle del *Rift* Africano (Figuras 6 y 7). Cuando los dos fragmentos de corteza continental se separan, comienza un período de volcanismo. El movimiento continuo permite al *rift* ampliarse y profundizarse, y eventualmente el mar se introduce en el continente para formar un cuerpo acuático largo y estrecho. El Mar Rojo es un ejemplo moderno. Con el tiempo los fragmentos de corteza continental se separan más y una corteza oceánica recién formada los separa, y un nuevo océano, como el Atlántico, se forma.

Hace 250 millones de años no existía el Océano Atlántico. En cambio, los continentes que ahora lo bordean, alguna vez estuvieron unidos en un solo y gigantesco continente. Hace aproximadamente 200 millones de años nuevos ejes de expansión dividieron

a este enorme continente (Figura 8). No sabemos con precisión cómo ocurrió esto, aunque se supone que nuevas corrientes de convección de la astenósfera y la mesósfera entraron en acción. Los nuevos ejes de expansión dividieron a la litósfera y durante el proceso rompieron al antiguo continente en los fragmentos que hoy conocemos. Estos fragmentos se desplazaron lentamente a sus posiciones presentes. Al principio el Océano Atlántico era un cuerpo estrecho de mar que separaba Norteamérica de Europa y el norte de África. Conforme el movimiento continuaba, el océano se ensanchaba y alargaba, dividiendo Sudamérica de África y creciendo hasta su tamaño actual. El Atlántico todavía se está expandiendo a razón de 5 cm por año.

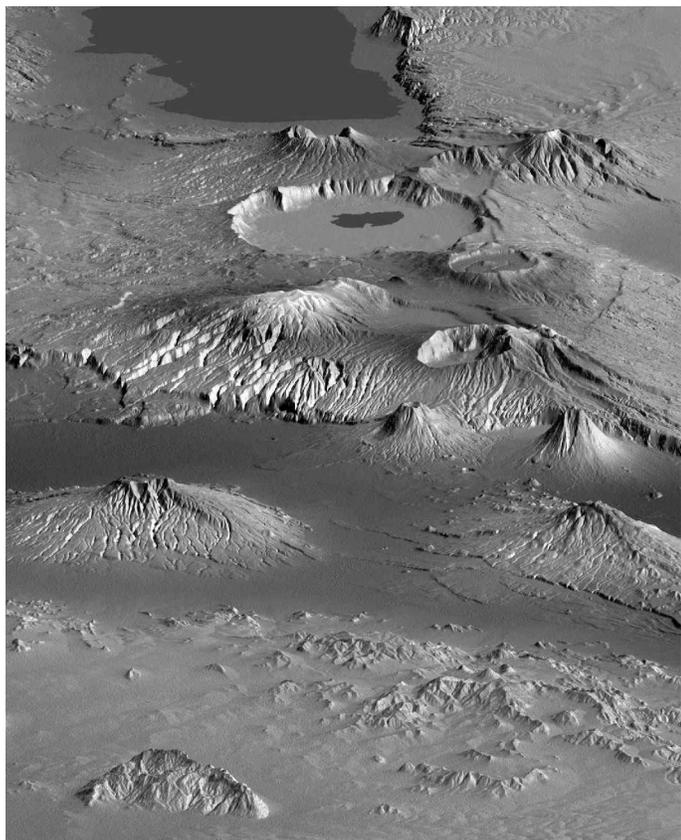


Figura 7. Modelo de elevación del norte de Tanzania, África, en el cual se muestra el Valle del "rift" Africano y su consecuente formación de volcanes. El extremo norte del lago Eyasi se encuentra en la parte superior de la imagen que está orientada hacia el suroeste. El lago en el cráter más ancho corresponde al volcán Ngorongoro (Imagen tomada de la página electrónica de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03356>).

La evidencia es abundante para señalar dónde coinciden las márgenes rotas. Si las piezas son reunidas nuevamente, las pendientes continentales a cada lado

del océano coinciden bastante bien como las piezas de un rompecabezas. La línea de coincidencia sigue al eje de expansión, lo que es la actual Cordillera Meso-Atlántica.

## 2. Márgenes Convergentes

Las llamadas Márgenes Convergentes ocurren cuando dos placas se mueven una hacia la otra. A lo largo de las márgenes convergentes, una de las placas debe, ya sea hundirse por debajo de la otra, en cuyo caso se refiere a tal margen como una zona de subducción, o chocar frontalmente con la otra placa, y en este caso se refiere a ese margen como zona de colisión (Figura 3).

*Zonas de subducción* Cerca de un eje de expansión, la litósfera es delgada y su límite con la astenósfera se acerca a la superficie. Este adelgazamiento sucede porque el magma que se eleva calienta la litósfera y solo una delgada capa cerca de la cima retiene las propiedades de dureza, rigidez y resistencia. Pero conforme la litósfera se aleja del eje de expansión, se enfría y se vuelve más densa. También, como resultado, la litósfera se hace más gruesa y el límite entre la astenósfera y la litósfera se mueve a más profundidad. Finalmente, aproximadamente a 1000 km del eje de expansión, la litósfera alcanza un espesor constante y está tan fría que es más densa que la astenósfera subyacente caliente y dúctil, y comienza a hundirse. La antigua litósfera con su cubierta de corteza oceánica se hunde en la astenósfera y eventualmente en la mesósfera. A este proceso se le llama subducción, y a las márgenes de las placas a lo largo de las cuales la litósfera se hunde se les llama zonas de subducción. Éstas están señaladas por trincheras profundas en el piso oceánico.

A medida que la franja de litósfera se hunde lentamente a través de la astenósfera, pasa por debajo de la región donde los geólogos podrían estudiarla directamente. En consecuencia, lo que sucede después son parcialmente conjeturas. Sin embargo, lo que es seguro es que la placa litosférica no regresa y no podría reaparecer en el eje de expansión; lo que sucede es que la placa es calentada y lentamente mezclada con el material del manto. La delgada capa de la corteza oceánica en la cima de la litósfera que se hunde, se funde y se convierte en magma, y una parte de ésta alcanza la superficie para formar volcanes. Como resultado, las zonas de subducción están marcadas por un arco de volcanes paralelo a ellas y a una distancia aproximada de 150 km de la trinchera que señala el margen de la placa (Figura 9, contraportada).

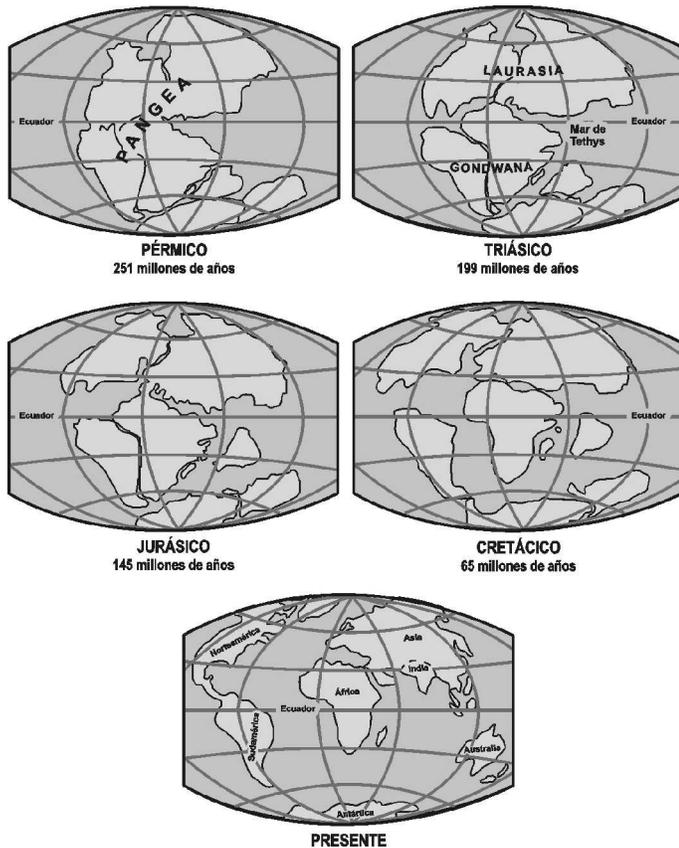


Figura 8. Reconstrucción paleogeográfica de la Tierra desde fines del Paleozoico (Imagen tomada de la página electrónica del Servicio Geológico de los Estados Unidos: <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/historical.html>).

**Zonas de colisión** En contraste, la corteza continental no se recicla en el manto; sigue un viaje más corto que termina más repentinamente. La corteza continental es más ligera aún que las regiones más calientes del manto. Como resultado, la corteza continental flota demasiado como para ser arrastrada hacia abajo junto con la litósfera que se hunde. Así, los pedazos de corteza del tamaño de los continentes, flotan sobre las placas de la litósfera y se desplazan de lugar a lugar sobre la superficie de la Tierra. Este movimiento se detiene cuando dos fragmentos de la corteza continental colisionan. Tales colisiones pueden ocurrir solo cuando la subducción de la corteza oceánica ocurre por debajo de uno de los fragmentos que chocan. Debido a que la placa que se hunde también arrastra un fragmento de corteza continental, una colisión inevitablemente ocurrirá cuando las dos piezas de la corteza continental se encuentren a lo largo de la zona de subducción. Estas zonas de colisión forman cadenas montañosas espectaculares. Los Alpes, los Himalaya y los Apalaches son el resultado de choques continentales (Figura 10). Debido a que la corteza continental no se hunde en el

manto, mucha de la evidencia que tiene que ver con los movimientos de placas antiguas queda registrada como prominencias y cicatrices de colisiones pasadas.

### 3. Márgenes Transformes

En el caso de las Márgenes Transformes, las placas simplemente se deslizan unas frente a otras, triturando y rebajando sus orillas. Estas márgenes de deslizamiento son enormes fallas verticales que atraviesan hasta la litósfera, las cuales están marcadas por zonas de rocas intensamente fracturadas y/o deformadas. Donde las fallas cortan corteza oceánica, marcan zonas alargadas de sierras y valles estrechos sobre el piso oceánico.

El movimiento de deslizamiento de las fallas transformes origina un gran número de terremotos de hipocentros someros, algunos de magnitudes importantes. La mayoría de las fallas transformes no tiene ninguna actividad volcánica asociada. Sin embargo, ocasionalmente, ocurre una pequeña separación entre las placas, y una falla transforme con "filtraciones" resulta en cierta actividad volcánica.

Una de estas fallas es motivo de constante monitoreo, la Falla San Andreas, debido a que representa una amenaza permanente de terremotos para una parte importante de California. Esta falla, que corre aproximadamente de norte a sur, separa a la placa de Norteamérica en el lado oriental, sobre el cual se encuentra asentada la ciudad de San Francisco, de la placa del Pacífico, en el lado occidental, sobre la cual se asienta la ciudad de Los Ángeles. La placa del Pacífico se mueve en dirección norte y la placa de Norteamérica, en dirección sur. Conforme las dos placas se deslizan una contra la otra, se trituran y desgastan, la ciudad de Los Ángeles se mueve lentamente hacia el norte y la ciudad de San Francisco hacia el sur. En ocasiones los márgenes de las placas se "enganchan" y "atoran", y las rocas a cada lado se flexionan y doblan. Cuando en un instante se desenganchan, las rocas se rompen y ocurre un terremoto.

### Importancia de la Litósfera

La importancia de la litósfera puede difícilmente exagerarse desde la perspectiva científica o de la sociedad. Desde un punto de vista exclusivamente científico, la litósfera conserva el único registro histórico de la geología, la biología y el clima de la Tierra. Los procesos magmáticos y metamórficos que ocurren a lo largo de las márgenes de las placas mantienen el transporte de la energía desde el interior de la Tierra a la super-

ficie, y el ciclo de los elementos dentro y fuera del manto. Desde el punto de vista de la sociedad, la litósfera es la capa dinámica responsable tanto de los riesgos naturales como de los recursos, así como de la superficie sobre la cual vivimos.

## 1. Riesgos geológicos a lo largo de las fronteras entre las placas tectónicas

Uno de los éxitos espectaculares de la tectónica de placas, ha sido su habilidad para explicar la distribución global de terremotos y, de hecho, un mapa de sismicidad es casi equivalente a un mapa de los límites entre placas tectónicas. Los terremotos ocurren a lo largo de los límites entre las placas debido a que la fricción impide la habilidad de las placas para moverse relativamente una con respecto a la otra. La naturaleza de esta fricción es muy variable, dependiendo del tipo de roca, la profundidad de la transición entre frágil y dúctil, la heterogeneidad o rugosidad de la superficie de falla y la forma de la falla. Por ejemplo, las rocas típicamente fallan más fácilmente bajo extensión que bajo compresión. Los sismos en las cordilleras meso-oceánicas tienden, entonces, a ser someros (< 10 km) y de pequeños a moderados en magnitud. Raramente ocurren cerca de los continentes, de forma que implican poco riesgo sísmico. Los sismos a lo largo de los límites transformes son más profundos (< 20 km) y de moderados a fuertes en magnitud. Cuando suceden en áreas pobladas, como el terremoto de San Francisco de 1906, pueden ser muy destructivos. Los terremotos más fuertes y más profundos (< 700 km) se generan en zonas convergentes. Los terremotos en zonas de subducción someras, tales como el sismo de Alaska de 1964, pueden ser particularmente dañinos, tanto por la vibración que producen en el suelo como por los *tsunamis* que pueden generar.

Los intentos por mitigar los riesgos sísmicos implican mejorar tanto los métodos de predicción cuando es probable que ocurran los sismos, como el diseño de las estructuras que los puedan resistir. Mientras que el estado actual de nuestro conocimiento de la concentración geográfica de los terremotos no permite aún una predicción a corto plazo, el conocimiento de la tasa de movimiento de las placas y el tamaño y frecuencia de los sismos históricos ha permitido por un lado una predicción a largo plazo (décadas o siglos) y por otro, estimar las probabilidades de que ocurran sismos a lo largo de los límites entre placas más acti-

vos. Los edificios y otras estructuras en áreas con riesgo sísmico son ahora diseñados para “ceder” de manera que sean menos vulnerables a las vibraciones del terreno, que no se colapsen de manera catastrófica ni que se amplifique la frecuencia natural de un movimiento intenso del suelo.

Las erupciones volcánicas y los deslizamientos desencadenados tanto por terremotos como por los volcanes también implican un riesgo importante a lo largo de los límites entre las placas. Aunque las erupciones volcánicas son más fáciles de predecir que los terremotos porque generalmente van precedidas en el marco de días a horas por pequeños sismos que marcan el movimiento del magma debajo del volcán, pueden ser violentamente explosivos y mortales.

El territorio de México se encuentra en una zona de confluencia de cuatro placas diferentes, lo que produce una incesante actividad volcánica que ha dado origen, entre otras provincias geológicas, al Eje Volcánico Transversal, en donde se encuentran los volcanes más importantes del país, como el de Colima, el Popocatepetl, el Iztaccihuatl, el Nevado de Toluca y el Pico de Orizaba.

En las zonas donde hacen contacto dos placas que se mueven en direcciones opuestas, llamadas de subducción o de convergencia, la placa más densa penetra bajo la de menor densidad. En el caso de México, el aumento de temperatura que genera la fricción de los márgenes de la placa de Norteamérica con la de Cocos, hace que las rocas de esta última pierdan agua y que ésta se difunda hacia las rocas de la placa de Norteamérica, reduciendo su punto de fusión. Al sufrir un incremento en su temperatura y presión, las rocas se funden, al mismo tiempo que se va creando una gran presión que busca una salida hacia arriba. Las fisuras formadas por la interacción de las placas permiten el paso del magma hacia la superficie. La corteza terrestre, cuyo espesor varía entre menos de 10 km y más de 40 km, cede en su parte más delgada o en donde ya existe una falla o una fractura. La tierra se agrieta y de ella salen vapores y gases, hasta que se desgarran por completo. Una lluvia de cenizas puede preceder a una explosión que arroje a grandes distancias fragmentos de lava ya solidificados, o bien el magma se abre paso de manera más suave, formando ríos de lava. Una serie de sismos antes y después de la explosión acompaña siempre el surgimiento o la reactivación de un volcán.



*Figura 10. Imagen satelital compuesta de las Montañas Himalaya. La imagen tiene una orientación norte-noroeste. La Meseta Tibetana está casi en el centro, y la planicie Taklamakan se puede ver como la parte más clara cerca de la parte superior de la imagen (Imagen tomada de la página electrónica de Wikipedia: [http://wikipedia.org/wiki/ImageHimalaya\\_composite](http://wikipedia.org/wiki/ImageHimalaya_composite)).*

## 2. Recursos almacenados en la litósfera

Tradicionalmente, la mayoría de las actividades de la ciencia han sido dirigidas hacia el descubrimiento, evaluación y explotación de recursos no renovables (a la escala de tiempo del hombre) como son el petróleo y la industria minera. Los procesos que ocurren dentro de las placas litosféricas y a lo largo de sus límites, tales como el magmatismo, el metamorfismo y el sepultamiento de sedimentos son los responsables de la generación y concentración de la mayoría de los recursos de la Tierra, tales como el carbón, el petróleo, el gas, los metales y las gemas. Ya que los científicos dedicados al estudio de la Tierra tienen ahora un mejor conocimiento de la naturaleza de las interacciones entre las placas, y de la geometría de los límites entre ellas en el pasado geológico, ha sido más fácil enfocar las actividades de exploración para predecir en dónde podrán descubrirse nuevos recursos, y de la misma manera, en dónde es extremadamente improbable que se puedan encontrar.

La estabilidad a largo plazo de la litósfera continental ha permitido también la acumulación y almacenamiento de recursos no renovables a lo largo de miles de millones de años. La sociedad industrial está acabando con muchos de estos recursos, especialmente los combustibles fósiles. Claramente, debemos ser más eficientes para encontrar nuevos depósitos y acelerar el desarrollo de fuentes de energía alternativas, incluyendo la geotérmica.

## 3. Las placas litosféricas y el clima

Dentro del marco del tiempo geológico, el movimiento de las placas litosféricas está constantemente cambiando el tamaño, la forma y distribución de los continentes y de las cuencas oceánicas. Esto a su vez controla el patrón de la circulación oceánica y atmosférica, y la variación en el nivel del mar, siendo ambos factores importantes en el cambio del ambiente global, al modificar las zonas de temperatura y precipitación.

Los registros del cambio en los patrones de circulación oceánica y del clima están conservados en los restos de esqueletos de organismos marinos sepultados en sedimentos del fondo oceánico. Así, la distribución de especies antiguas de aguas cálidas y de aguas frías marca el inicio del patrón de circulación de la Corriente del Golfo, ligado al incremento de la anchura del Océano Atlántico por la expansión de la Cordillera Meso-Atlántica, y la iniciación de la Corriente Circumpolar Antártica con la apertura del Pasaje Drake entre Sudamérica y Antártica.

El levantamiento de las Montañas Himalaya y la Meseta Tibetana (Figura 10) durante los últimos 40 millones de años, a medida que la India chocaba con Asia, modificó de forma importante el clima de Asia Central, y en consecuencia los monzones dominan ahora los sistemas climáticos. El registro climático demuestra que los cambios locales en los patrones de circulación oceánica y atmosférica en un área pueden traducirse en cambios ambientales a nivel mundial. De

esta forma, los estudios de la respuesta global a la tectónica de placas -cambios inducidos en el clima-, aportan limitantes críticas sobre la predicción del impacto final sobre el clima de la Tierra de los cambios más inmediatos al ambiente causados por las actividades del hombre.

En los pasados cientos de miles de años, los cambios en el nivel del mar fueron causados por el cambio en el volumen de las capas de hielo continentales. Sin embargo, en los pasados cientos de millones de años, aun las fluctuaciones más grandes en el nivel del mar han sido el resultado directo del movimiento de las placas litosféricas. Los sedimentos depositados en ambientes marinos someros en las márgenes continentales y en las plataformas hace 510 millones de años y de nuevo hace 90 millones de años, indican elevaciones en el nivel del mar desde 400 hasta 600 m relativos al nivel actual del mar. Los movimientos de las placas afectan el nivel del mar al cambiar el volumen total de las cuencas oceánicas. Debido a que la profundidad del piso oceánico se incrementa con el aumento de la edad de la placa litosférica, los períodos de expansión acelerada de las cordilleras meso-oceánicas llevan a una reducción en el promedio de edad, y por lo tanto en el volumen total de las cuencas oceánicas.

El fallamiento normal de alto ángulo de grandes proporciones en los continentes (*rifting*) tiene un efecto similar. La litósfera continental extendida consume más área sobre la superficie de la Tierra comparada con su estado "no-extendido", y por lo tanto desplaza más volumen de agua del océano. Por el contrario, ya sean los períodos más activos de subducción del piso oceánico joven o bien la colisión continental pueden incrementar el volumen de las cuencas oceánicas, provocando un descenso en el nivel del mar. Aunque los cambios del nivel mar controlados tectónicamente son muy lentos comparados con aquéllos provocados por glaciación, ellos imponen una tendencia de largo plazo sobre las fluctuaciones de más alta frecuencia.

#### 4. Transferencia de masa y energía entre la atmósfera, la hidrósfera y la litósfera

Las placas litosféricas son una parte integral del ciclo global en la cual los elementos químicos y la energía son intercambiados entre el manto subyacente, los océanos y la atmósfera. La actividad volcánica a lo largo de los límites entre las placas es la responsable de la expulsión de compuestos del manto tales como agua, metano, bióxido de carbono, ácido

clorhídrico, bióxido de azufre, etc., hacia los océanos y la atmósfera. El intemperismo de las rocas de la corteza en los continentes y en el piso oceánico libera cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) hacia los ríos y océanos. Estos constituyentes disueltos pueden ser más tarde redepositados en sedimentos oceánicos por medio de precipitación biogénica del carbonato de calcio y la sílice, o por medio de la sedimentación de arcillas extraídas del agua de mar. Finalmente, los elementos son parcialmente reciclados en el manto al ser transportados hacia el interior en las zonas de subducción.

Tanto los datos gravimétricos como sísmicos sugieren que la corteza continental y la litósfera pueden hundirse hasta una determinada profundidad en el manto, y así pueden constituir un mecanismo importante para la renovación de la heterogeneidad en los sistemas isotópicos y minerales en el manto de la Tierra convectivamente mezclado. Sobre todo, el sistema parece pasar por un largo período de estabilidad, de forma que la tasa de constituyentes disueltos que entran y la de los que son extraídos en los océanos y en la atmósfera, están balanceadas.

Aunque la tasa a la cual el piso oceánico es reciclado es lenta (100 millones de años), en solo 10 millones de años el volumen total del agua del océano puede completar un ciclo por medio de los sistemas hidrotermales que operan a lo largo de las cordilleras meso-oceánicas, donde las rocas volcánicas interactúan directamente con el agua marina. Las escalas de tiempo involucradas en un sistema volcánico individual son aún más cortas e impactan a la Tierra a escala del tiempo humano. Por ejemplo, las temperaturas en algunos sistemas hidrotermales de cordilleras meso-oceánicas exceden los 300 °C, lo que significa que cualquier cantidad de magnesio disuelto en el agua de mar que reaccione en el sistema puede ser completamente extraída y depositada en vetas hidrotermales en alrededor de una semana. La erupción subaérea de un volcán importante puede ocurrir en cuestión de minutos y liberar gases y partículas a la atmósfera, los cuales en períodos de semanas a años afectan profundamente la radiación solar y por lo tanto, el clima.

#### Autor

Juan Carlos García y Barragán; Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México; jcarlos@servidor.unam.mx

## La hidrósfera

*"¡...Es azul!, ... ¡la Tierra es azul!..."*

*Yuri Gagarín*

*Primera persona que pudo ver  
a la Tierra desde el espacio exterior.*

*Qué inapropiado es llamar a este planeta Tierra,  
cuando es claramente Océano.*

*Arthur C. Clarke*



*Figura 1. Planeta Tierra. La Hidrósfera (NASA, imagen cortesía de Reto Stöckli y Robert Simmon).*

### ¿Qué es la hidrósfera?

La hidrósfera o capa de agua que cubre la Tierra (Figura 1), representa casi las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta. El agua es esencial para los seres vivos y para la vida; los organismos no sólo requieren de la presencia del agua, sino además dependen de su abasto continuo para mantenerse con vida. Los humanos, como los animales y muchas plantas, se encuentran formados de al menos un 62% de agua, y es más, algunas criaturas acuáticas, como las medusas, se componen de hasta un 98% de agua. A su vez, el agua también es un agente geológico importante para el modelado de la superficie de nuestro planeta; diluye contaminantes y constituye un recurso imprescindible para la agricultura, industria, generación de energía eléctrica, transporte, higiene, etc.

Se cree que la cantidad de agua sobre la Tierra no ha cambiado en el tiempo, es decir, la cantidad de agua ahora es la misma cantidad que había cuando reinaban los dinosaurios. Con 1322 millones de km<sup>3</sup> (97.2 %

del volumen total), los océanos son el principal depósito de agua en el planeta, seguidos por los glaciares que contienen 29.2 millones de km<sup>3</sup> (2.2 %) de agua. Con menos cantidad, las aguas subterráneas acumulan 8.4 millones de km<sup>3</sup> (0.6 %); los ríos y lagos almacenan 0.2 millones de km<sup>3</sup> (0.002 %), y la atmósfera contiene 0.01 millones de km<sup>3</sup> (0.001 %). Si hacemos cuentas, la cantidad de agua dulce comparada con el agua salada de los océanos es casi nada, y la cantidad de agua dulce disponible es mucho menor. Por ejemplo, si toda el agua del planeta se pudiera poner en un garrafón de agua, solo una cucharada sería el agua dulce que tenemos disponible, por esto es sumamente importante cuidarla. Sin embargo, aunque la mayor parte del agua se encuentra en los océanos y glaciares, la cantidad de agua presente en la atmósfera y sobre la tierra firme (lagos, arroyos, ríos, etc.) es lo suficientemente grande para hacerla un agente significativo en el transporte de sustancias entre la litósfera y los océanos, y al mismo tiempo, es un excelente solvente que se mueve y fluye fácilmente, lo que hace del agua en todas sus formas el arquitecto y modelador de la superficie terrestre.

Una característica muy particular de la hidrósfera que hace de la Tierra un lugar muy especial, es que el agua siempre está en movimiento. Además, la hidrósfera tiene una gran capacidad para almacenar energía que contribuye a regular el clima del planeta. ¿Por qué es importante? Porque regula la temperatura del planeta y permite que tengamos un rango de temperatura agradable y más o menos estable, lo que ocasiona que el agua permanezca en su mayor parte en estado líquido. Es decir, si estuviéramos en un planeta muy caliente, toda el agua estaría en estado gaseoso, y si el planeta fuera muy frío, no importaría la cantidad de agua, toda estaría congelada.

### ¿Qué es el agua?

El agua (Figura 2) es la sustancia más abundante en la superficie de la Tierra, y tiene algunas propiedades físicas y químicas inusuales. Cada molécula de agua está hecha de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H<sub>2</sub>O). El agua pura no tiene color ni olor. El agua puede encontrarse en sus tres fases: gaseosa o vapor de agua, agua líquida y agua sólida o hielo.

El punto de fusión del agua es de 0°C y el de ebullición de 100°C. El agua es un importante agente geo-

lógico que facilita, entre otras cosas, la fusión de las rocas, su desgaste y transporte. La densidad del agua dulce es de  $1 \text{ g/cm}^3$  y la del hielo de sólo  $0.917 \text{ g/cm}^3$ , aunque puede haber variaciones en función de la temperatura y de la salinidad. Esta propiedad del agua permite la vida en los océanos polares ya que impide que el agua se congele bajo el hielo superficial.



Figura 2. Agua (Dominio público. <http://www.pbase.com/jeffreyk/water>).

Otras propiedades del agua son el poseer calor latente y calor específico elevados; esto le permite al agua absorber grandes cantidades de calor sin cambiar mucho su temperatura, pero el calor almacenado por la hidrósfera durante el día en regiones calientes, se transfiere por convección hacia las regiones más frías o a otros lugares menos calientes, como a las aguas oceánicas profundas y a la atmósfera durante el invierno. El agua, a su vez, tiene un alto calor de vaporización, es decir, las moléculas que se convierten en vapor se llevan gran cantidad de la energía almacenada, que se traduce en movimiento. Esto es muy importante ya que como consecuencia, el agua tiene poder refrigerante (por ejemplo, el sudor, jadeo, transpiración de las plantas, automóviles, industria, etc.). Ya que se requiere de grandes cantidades de energía para elevar su temperatura, lo que se relaciona con la evaporación del agua o la fusión del hielo, el agua influye directamente en el clima de la Tierra, controlando en gran medida la distribución de la temperatura, haciendo a los climas oceánicos más uniformes que los continentales.

Otras de las propiedades del agua son su elevada tensión superficial y su gran capacidad humectante o adsorbente (es decir, adherirse a un sólido y no recubrirlo, lo que no debe confundirse con

absorbente). Estas propiedades permiten que el agua pueda ascender (en plantas, incluso por varios metros) por capilaridad. Igualmente el agua tiene la propiedad de disolver gran variedad de compuestos; en los seres vivos transporta nutrientes y sustancias de desecho, asegurando reacciones esenciales para que la vida continúe con su desenvolvimiento; en ríos y océanos el agua distribuye sales, pero esta propiedad hace que también se contamine con facilidad. Finalmente, las sales disueltas que diferencian el agua salina del agua dulce, no afectan mayormente a la mayoría de las propiedades discutidas arriba.

### ¿De dónde vino el agua?

Hace unos 4600 millones de años, la Tierra se fue formando por acreción de material cósmico y gases. El calor liberado por este proceso fue lo suficientemente alto para que parte del material acrecionado, en especial el material con base de sílice, como lo son las micas y los anfíboles, liberara su agua interna. Es decir, la continua colisión de meteoritos, asteroides y partículas, y las abundantes erupciones volcánicas durante este tiempo, arrojaron a la atmósfera, entre diferentes gases, grandes cantidades de vapor de agua. Durante este periodo, la temperatura era tan alta que hacía que toda el agua se mantuviera en forma de vapor. Entre hace unos 4200 y 3800 millones de años, el planeta ya se había enfriado lo suficiente, por debajo del punto de ebullición del agua, como para que gran parte del vapor formado se hubiera licuado, provocando que gigantescas precipitaciones ocurrieran, llenando de agua las partes más bajas de la superficie terrestre y formando lagos y océanos. Pero a pesar de que mucha agua se liberó durante la formación de la Tierra, las rocas que forman la corteza terrestre la contienen aún en grandes cantidades, aunque la mayor reserva de agua disponible para los seres vivos se encuentra en los océanos.

### El ciclo hidrológico

Mientras la cantidad total del agua permanece relativamente constante en la Tierra, el agua a su vez permanece en constante movimiento. Este movimiento se conoce como el ciclo hidrológico (Figura 3). Este ciclo inicia con la energía del sol que calienta el agua y la evapora; es decir, el agua de los océanos, mares, ríos, lagos, etc., se evapora constantemente formando el vapor de agua de la atmósfera. Este vapor a su vez se condensa cayendo en forma de lluvia, granizo o nieve sobre continentes, islas, montañas y océanos. El agua

que cae como nieve o lluvia sobre las montañas, si no se acumula en capas de hielo o se congela, desciende por sus laderas para formar riachuelos, arroyos y ríos, y se infiltra en el terreno acumulándose en forma de aguas subterráneas, acabando la mayor parte de estos escurrimientos en los océanos. En los polos, el agua se acumula como nieve, se congela formando glaciares y puede ser almacenada de esta forma por millones de años. El resto del agua es evaporada, consumida o transpirada por plantas y animales, volviendo en algún momento de nuevo a la atmósfera (Figura 3); el sol mantiene este ciclo funcionando continuamente.

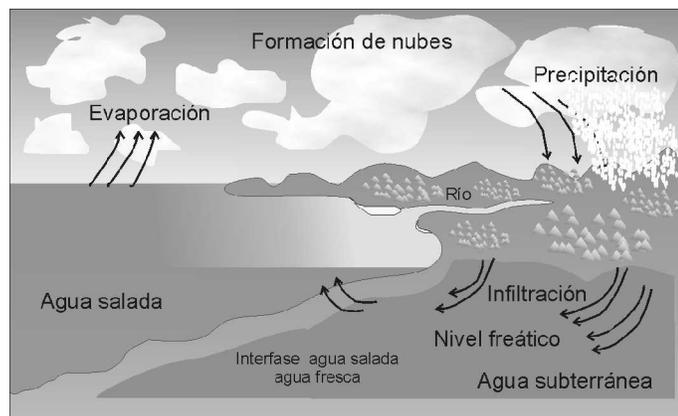


Figura 3. Ciclo hidrológico.

El agua que se encuentra "almacenada" en los océanos y glaciares es mayor en cantidad que el agua que se encuentra disponible y en movimiento dentro del ciclo hidrológico. Se ha calculado que en un año se evaporan y precipitan alrededor de 500,000 km<sup>3</sup> de agua, lo que nos da una media de 980 l/m<sup>2</sup>. Es decir, si la Tierra estuviera cubierta por una capa de agua de alrededor de un metro, esta cantidad se evaporaría y precipitaría durante el año. En cambio, la cantidad de agua en forma de vapor atmosférico que permanece constante anualmente es de sólo 12,000 km<sup>3</sup>, agua que también forma parte de los 500,000 km<sup>3</sup>, parte de los cuales en un momento dado se han evaporado, y tiempo después han precipitado, formando parte de las precipitaciones anuales y continuando con el ciclo hidrológico. Aunque estos datos se consideran como la media terrestre de evaporación y precipitación, la distribución de éstas no es igual en todas partes. Por ejemplo, en algunos desiertos anualmente llueven menos de 200 mm por año, mientras que en algunas zonas de montaña llueven anualmente 6,000 mm o más.

Si se contamina un río, al cabo de pocos días o semanas puede quedar limpio (dependiendo del conta-

minante), por el propio arrastre de los contaminantes hacia lagos, mares, océanos y aguas subterráneas, en donde se diluirán en grandes cantidades de agua, aunque no hay que olvidar que los contaminantes no desaparecen, sino que se acumulan en los lagos, mares, océanos y aguas subterráneas. Pero si se contamina un acuífero subterráneo, el problema persistirá durante decenas o cientos de años y no hay que olvidar que ésta es el agua que consumimos.



Figura 4. Nubes formándose en la región ecuatorial (Galápagos). Fotografía de la autora.

El ciclo hidrológico tiene también efectos importantes en la administración de la energía alrededor de la Tierra. Un primer efecto es mantener más o menos estable la temperatura promedio de la Tierra. Es decir, el vapor de agua atmosférico (junto con el bióxido de carbono y el metano) tiende a absorber las radiaciones infrarrojas de onda larga emitidas por la superficie de la Tierra, atrapando parcialmente la energía de onda corta. Esta característica hace que una temperatura superficial promedio alrededor de 14°C se mantenga, es decir, hace que la temperatura promedio terrestre sea más alta que la que habría si no hubiera vapor de agua. Del 51% de la radiación solar que incide en la atmósfera y alcanza la superficie terrestre, la mitad (23%) es utilizada para evaporar agua.

Otro efecto del agua es el transporte de energía. En el ciclo hidrológico, el vapor de agua se mueve con las corrientes atmosféricas, haciendo que este transporte atmosférico de agua sirva como un mecanismo importante para el transporte de energía termal, cuando el vapor del ecuador se mueve hacia las regiones subtropicales. Es más, un tercio de la entrada de energía al sistema viene de la liberación del calor latente del vapor de agua formado en las regiones ecuatoriales (Figura 4).



Figura 5. Aguas oceánicas, aguas marinas y lagunas costeras. Diversidad de vida. Fotografías de la autora.

## Distribución del agua en la Tierra

Todos sabemos que hay agua salada y agua dulce. También sabemos que casi la totalidad del agua salada se encuentra formando mares y océanos, mientras que el agua dulce se encuentra formando en su mayor parte hielo y aguas subterráneas. En una proporción mucho menor, aunque su importancia biológica es grande, se encuentran el agua dulce situada sobre los continentes en forma de arroyos, ríos, lagos, etc., y el agua que está en la atmósfera.

Podemos diferenciar de acuerdo a la cantidad de sal disuelta en el agua los siguientes tipos de agua:

**Salada:** con una salinidad media de 35 gramos por litro de agua, esta agua forma parte de los mares y océanos. La salinidad de las aguas varía de acuerdo a la temperatura, la evaporación y el aporte de agua dulce por parte de los ríos y las precipitaciones.

**Dulce:** a diferencia de la anterior, esta agua tiene poca salinidad, debido a que proviene de las precipitaciones de vapor atmosférico en forma de lluvia, nieve y granizo, formando parte de los ríos y lagos. La cantidad de agua dulce que consume una persona anualmente oscila entre 900 m<sup>3</sup> en una sociedad agrícola y 1500 m<sup>3</sup> en una sociedad industrial.

## Aguas oceánicas

### Océanos y mares

Desde su formación hace casi 4000 millones de años, los océanos contienen la mayor parte del agua líquida de nuestro planeta. Entender su funcionamiento es muy importante para comprender el clima y para explicar la diversidad de vida que hay en la Tierra (Figura 5).

A las grandes masas de agua que separan los continentes las llamamos océanos. Estos son cinco (Figura 6). El más extenso es el Pacífico, que supera en extensión al conjunto de los continentes con sus 180

millones de km<sup>2</sup>. Los otros cuatro son el Atlántico, el Índico, el Antártico o Austral y el Ártico.

Dentro de los océanos llamamos mares a algunas zonas cercanas a las costas. Tienen profundidades pequeñas, están situados casi siempre sobre la plataforma continental, y por razones históricas o culturales tienen nombre propio.

### Corrientes marinas

Las diferencias de temperatura y salinidad, la rotación terrestre, tormentas, terremotos, etc., son el origen de las corrientes de agua. Existen diferentes tipos de corrientes: superficiales, profundas, de deriva, de contorno, de turbidez, etc.

Las aguas de la superficie del océano son movidas por los vientos dominantes formando gigantescas corrientes superficiales en forma de remolinos. El giro de la Tierra hacia el este, junto con la disposición de las masas continentales, influye en la trayectoria de las corrientes marinas porque tiende a acumular el agua contra las costas situadas al oeste de los océanos, como cuando movemos un recipiente con agua en una dirección y el agua sufre un cierto retraso en el movimiento y se levanta contra la pared del otro lado del recipiente. Según algunas teorías, este efecto explica cómo las corrientes más intensas, como la del Golfo en el Atlántico y la de Kuroshio en el Pacífico, se localizan en estas zonas. Este mismo efecto del giro de la Tierra (efecto Coriolis) explicaría las zonas de afloramiento o surgencias que hay en las costas este del Pacífico y del Atlántico, en las que sube el agua fría del fondo hacia la superficie. Este fenómeno es muy importante desde el punto de vista económico, porque el agua ascendente arrastra nutrientes a la superficie y en estas zonas prolifera la pesca. Las pesquerías de muchos países radican en este fenómeno.

Los anticiclones subtropicales (vientos alisios) también tienen efecto sobre las corrientes y causan las corrientes ecuatoriales dirigidas al oeste, que están sepa-

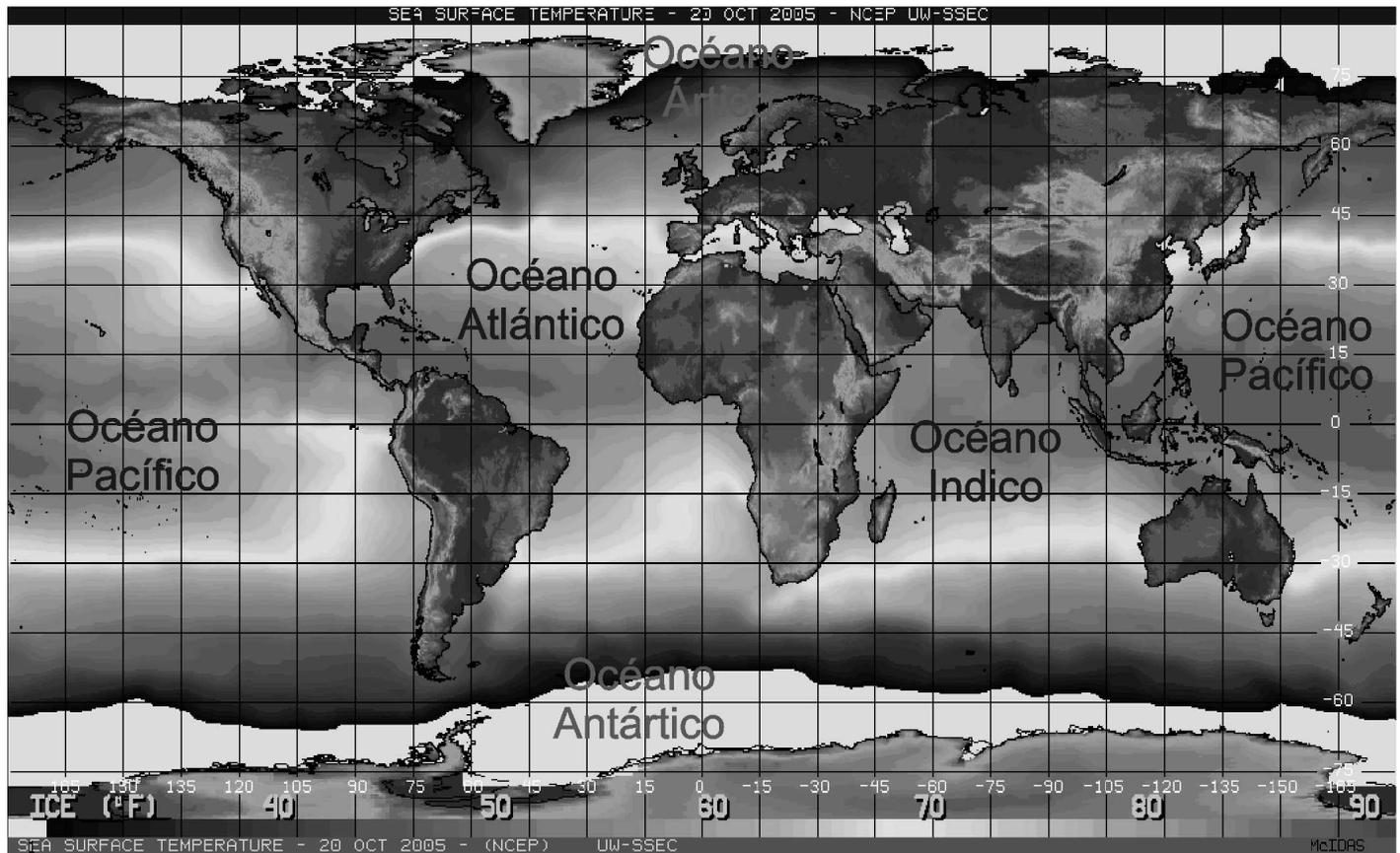


Figura 6. Océanos y temperatura superficial del agua ([http://www.hurrwarn.com/sst\\_map.htm](http://www.hurrwarn.com/sst_map.htm)).

radas por la contracorriente ecuatorial. Estas corrientes equatoriales se desvían hacia el polo formando corrientes cálidas paralelas a la costa (por ejemplo, la corriente del Golfo o de Florida, en el este de Norteamérica y la corriente de Kuroshio, en Japón). Los vientos del oeste producen un movimiento lento del agua (deriva del viento del oeste), mucho más extenso en el hemisferio austral por poseer un océano más abierto. Cuando estas corrientes llegan a las costas orientales se desvían, bien sea hacia el norte (por ejemplo, las corrientes frías de Humboldt o del Perú, y la de Benguela frente a la costa suroccidental africana, ambas procedentes del hemisferio sur) o bien hacia el sur (la de Canarias y la de California que circulan en el hemisferio norte). Además, tres importantes corrientes de agua fría existen en el hemisferio norte, y pasan del Ártico al Pacífico y al Atlántico por estrechos (son las corrientes de Kamchatka en el estrecho de Bering, la de Labrador en el estrecho de Davis y la de Groenlandia en el estrecho de Dinamarca).

En los océanos hay también corrientes profundas. Estas se sitúan en la masa de agua situada por debajo de la termoclina o capa oceánica de transición, entre la capa llamada de mezcla (localizada cerca de la superficie donde la temperatura se aproxima a la tempera-

tura superficial) y la capa de agua profunda o fría. En esta capa de transición, la temperatura baja bruscamente para alcanzar la temperatura mucho más fría de la capa profunda. Es decir, tanto la capa de mezcla como la capa profunda son relativamente uniformes en temperatura; y la termoclina representa la zona de transición entre ambas capas. En ella, el agua se desplaza por las diferencias de densidad debidas a los cambios de temperatura y salinidad, dando lugar a corrientes termohalinas. Las aguas de los mares polares son más densas y tienden a hundirse ya que son más frías y de mayor salinidad, por lo tanto, se dirigen hacia el ecuador, desplazando hacia la superficie las aguas más cálidas y menos salinas que tienden a ascender. Esta es la forma en que se generan corrientes verticales unidas por desplazamientos horizontales para reemplazar el agua movida. En algunas zonas, las corrientes profundas coinciden con las corrientes superficiales, mientras en otras van en contracorriente.

Uno de los efectos más importantes de las corrientes es la distribución del calor en el planeta. Esto es, las corrientes oceánicas trasladan grandes cantidades de calor desde las zonas ecuatoriales a las regiones polares. Estas corrientes, junto con las corrientes atmosféricas, son las responsables de que no sean tan fuertes

las diferencias térmicas en la Tierra como las que se darían en un planeta sin atmósfera ni hidrósfera. Por esta razón su influencia en el clima es tan notable.

#### Los fenómenos de "El Niño" y "La Niña"

Los fenómenos de "El Niño" y "La Niña" se originan en el Pacífico central, frente a las costas de Perú y Ecuador donde, al disminuir la intensidad de los vientos alisios, ocurre una acumulación de aguas cálidas y un sobrecalentamiento de las mismas. Luego, esta agua se dirige hacia el este, causando una profunda depresión en la termoclina y ocasionando grandes cambios en el clima de la región, como sequías prolongadas o fuertes lluvias. Este fenómeno ("El Niño") se repite cíclicamente cada 3 a 7 años y produce un calentamiento entre 0 y 3 °C en la superficie del agua. Con menor frecuencia puede ocurrir lo contrario, que descienda la temperatura, dando paso a "La Niña".

Debido a que ocurría en diciembre, el mes del Niño Jesús, el fenómeno fue bautizado como El Niño por un pueblo de pescadores en el Perú. "El Niño" y "La Niña" son fenómenos naturales que sólo alcanzan una intensidad excepcional en algunas ocasiones. "El Niño" suele ser más devastador; en las costas del continente sudamericano, la elevación de la temperatura de las aguas altera todo el ecosistema marino, ya que la depresión de la termoclina inhibe las surgencias, el plancton muere al no llegar nutrientes desde las profundidades y decrece la población de peces (arruinando la pesquerías). Simultáneamente, las presiones atmosféricas bajas producen prolongadas e intensas lluvias en el continente, lo que provoca inundaciones devastadoras. No obstante, al otro extremo del Pacífico, la sequía y los incendios arrasaron Oceanía.

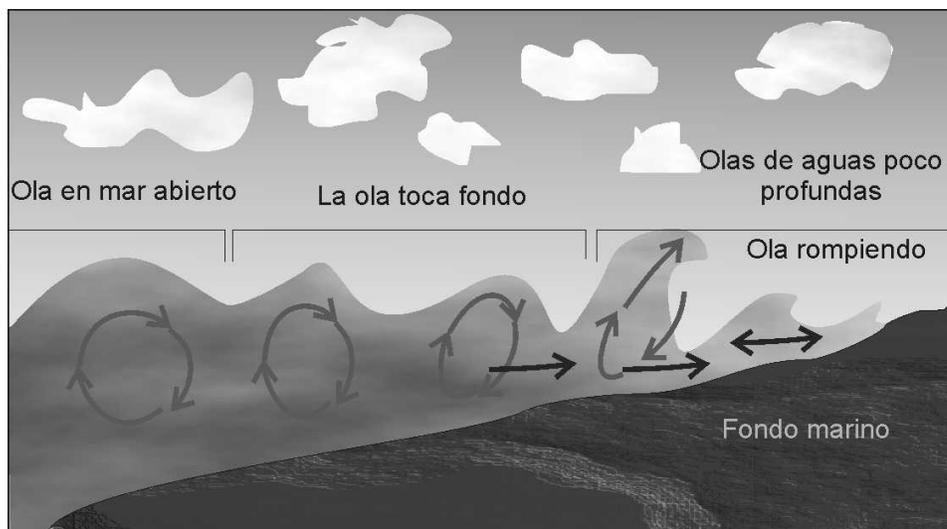


Figura 7. Tsunami : "Olas de puerto" en japonés.

Olas, mareas y corrientes costeras. Modelado de la costa.

Las olas son formadas por los vientos que soplan sobre la superficie de las aguas. Al soplar el viento, las partículas de agua suben y bajan siguiendo en su movimiento la forma de un cilindro horizontal, es decir sin desplazarse hacia adelante. Sin embargo, cuando llegan a la costa y el cilindro roza en su parte baja con el fondo marino, los cilindros empiezan a rodar, acaban desequilibrando la masa de agua, y es cuando rompen las olas. Otra forma de producir olas es mediante terremotos o movimientos sísmicos que ocurren en el fondo marino, o cuando se deslizan enormes bloques de tierra o hielo hacia un lago, mar u océano, produciendo lo que se conoce como tsunami (Figura 7), o las llamadas olas gigantescas.

Las mareas son los cambios periódicos del nivel de mar causados por las fuerzas gravitacionales que ejercen principalmente la Luna y el Sol sobre la Tierra. También es causa de mareas la presión atmosférica, aunque en menor grado. Las mareas son de gran importancia para los organismos costeros que viven en la zona intermareal ya que estos tienen que adaptarse a cambios muy bruscos; es decir, durante unas horas la zona está cubierta por las aguas marinas y es azotada por las olas, y luego esta situación es seguida de otras horas sin agua o, incluso, en contacto con aguas dulces, si llueve. Al mismo tiempo, en algunas costas, debido a la forma que tienen, se forman fuertes corrientes de marea, que al subir y bajar arrastran arena y demás sedimentos y remueven el fondo en donde viven diferentes organismos.

A lo largo de las costas, se suelen producir corrientes costeras o de deriva, muy variables según la forma de la costa y las profundidades del fondo, que son de mucho interés porque, al igual que las olas y las mareas, son las fuerzas modeladoras de playas, estuarios y otras formas costeras.

En la formación de los distintos tipos de ecosistemas costeros como marismas, playas, fosas intermareales, dunas, etc., también influyen de forma importante los ríos que desembocan en el lugar y la naturaleza de las rocas que forman la costa.



Figura 8. Arroyo, riachuelos y ríos. Fotografías de la autora.

## Aguas continentales

### Ríos

Los ríos (Figura 8) son corrientes de agua que fluyen con continuidad, nacen en manantiales en los que las aguas subterráneas surgen hacia la superficie o en lugares en los que se funden los glaciares. Desde el lugar de su nacimiento siguen las pendientes del terreno hasta llegar a un lago, mar u océano. Generalmente, un río, con sus afluentes, forma parte de una red de drenaje que cubre un área conocida como cuenca hidrográfica. La separación entre cuencas hidrográficas se conoce como divisoria de aguas, parteaguas o división continental. Desde su nacimiento en una montaña hasta su desembocadura en un lago o el mar, el río suele ir disminuyendo en velocidad y pendiente. Normalmente la pendiente es fuerte en el primer tramo del río, cuando viaja por las montañas (tramo alto), y se hace muy pequeña, casi horizontal, cuando se acerca a la desembocadura (tramo bajo). El perfil longitudinal de un río muestra muy bien este acontecer desde su origen hasta que llega al mar. Algunas veces los ríos terminan en zonas desérticas, donde sus aguas se pierden por infiltración y evaporación. La desembocadura marca el nivel base del río. Dependiendo también en qué parte de este perfil se encuen-

tren las aguas, los ríos sufren variaciones en su caudal que es rara vez constante a lo largo del año: a menudo, en las estaciones lluviosas aumenta y en las secas disminuye, aunque algunos ríos presentan el caudal máximo en la época del deshielo. Las crecidas pueden ser graduales o muy bruscas.

### Lagos, lagunas y estanques

Los lagos, lagunas y estanques (Figura 9) son cuerpos de agua dulce o salada que se encuentran lejos del mar. Se forman cuando el agua que pasa es acumulada en una zona de depresión que no tiene salida directa al mar. En muchos casos, del lago sale un río que va al mar, pero en otros no hay desagüe, sino que las aguas se evaporan a la atmósfera directamente desde el lago.

### Aguas subterráneas

Parte del agua que precipita desde la atmósfera o que se derrite desde los glaciares escurre sobre el terreno hasta llegar a ríos y lagos (agua de escorrentía), pero otra parte se infiltra, ya sea directamente cuando llueve, o desde los ríos y lagos. Parte del agua mana desde el suelo por evapotranspiración o por manantiales, o alimenta ríos y lagos a través de su lecho. Las rocas y suelos que dejan pasar el agua se llaman



Figura 9. Lagos, lagunas y estanques. Fotografías de la autora.

permeables en contraposición a las impermeables que no dejan pasar el agua. El agua que penetra por los poros de una roca permeable acaba llegando a una zona impermeable que la detiene. Así, la parte permeable se va llenando de agua (zona de saturación). La zona por encima de ésta, en donde los poros todavía tienen aire, se llama zona de aireación, y el contacto entre las dos zonas se conoce como nivel freático. El nivel freático emerge por encima de la superficie cuando tras fuertes lluvias el suelo se encharca. Las rocas porosas y permeables que almacenan y transmiten el agua se llaman acuíferos.

Los principales tipos de acuífero son:

*Acuíferos detríticos.* Están formados por fragmentos de rocas, como arenas, conglomerados o gravas, que almacenan el agua en los espacios intersticiales.

*Acuíferos kársticos.* Algunas rocas son disueltas por el agua y forman unas estructuras geológicas típicas que conforman el denominado Karst, que son capaces de almacenar grandes cantidades de agua y se encuentran en áreas de rocas carbonatadas, principalmente calizas, pero también se pueden encontrar en dolomías, yesos y sales, formando galerías y cuevas.

## Aguas Congeladas

### Hielo y glaciares

Los glaciares (Figura 10) son grandes masas de hielo que se forman por compactación y recristalización de la nieve, cuando la nieve que cae va acumulándose de un año a otro, sin oportunidad de fundirse. Por la presión, la nieve va perdiendo el aire y acaba formándose primero hielo lechoso y luego hielo azul, tan transparente como el cristal. El avance o retroceso

de un glaciar está determinado por el balance entre la acumulación y la ablación.

Para que existan glaciares en una zona se requieren dos condiciones:

1. que la temperatura promedio se mantenga lo suficientemente baja para permitir que la nieve se acumule de un año a otro; esto sucede en las zonas ecuatoriales a partir de los 5000 m de altitud y en la Antártida al nivel del mar.

2. que se tenga una precipitación suficiente y que sea mayor que la ablación; así, por ejemplo, hay lugares del norte de Siberia que son muy fríos, pero en los que llueve tan poco que la capa de nieve rara vez supera el metro de altura.

En las regiones polares los glaciares cubren grandes extensiones y se les llama casquetes glaciares o *inlandsis*. En el resto del mundo sólo encontramos glaciares de montaña que en total ocupan una extensión treinta veces menor que la ocupada por los *inlandsis*. Cuando los *inlandsis* están rodeados de agua de un océano o lago, algunos bloques se separan constituyendo bloques de hielo flotantes de todos los tamaños llamados *icebergs* o montañas de hielo (Figura 11).

### Zonas periglaciares

Se llama zonas periglaciares a las grandes extensiones que rodean a los casquetes glaciares o que se sitúan inmediatamente por debajo de las zonas de nieves perpetuas de las montañas. En las zonas periglaciares, el suelo o permafrost está helado la mayor parte del año, pero no está cubierto por el hielo permanentemente. Cuando en la primavera se deshiela la capa más superficial, se forman grandes charcos en los que se reproducen los mosquitos.



Figura 10. Glaciares de montaña. Popocatepetl y Nevado de Toluca. Fotografías de la autora.

## Glaciaciones e interglaciaciones

Durante la historia de la Tierra, entre las eras del Precámbrico y Paleozoico ha habido siete, y quizás más, episodios de amplias glaciaciones. Las glaciaciones han sido también lo más característico de los últimos dos millones de años de la historia de la Tierra. Su influencia es tan grande que marcan el inicio de un periodo geológico distinto, al que se conoce como Cuaternario, que es el periodo en el que nos encontramos. A lo largo de este periodo se han sucedido épocas más frías, en las que los hielos se han apoderado de grandes extensiones en el norte y el sur del planeta, y épocas más templadas en las que las aguas heladas se han retirado hacia las cercanías de los polos o las altas montañas. Estas fluctuaciones climáticas han tenido una gran influencia en la distribución de los seres vivos.



Figura 11. Iceberg. Ver el gran tamaño del iceberg en comparación con la persona en la fotografía. Dominio público. <http://www.habeeb.com/images/iceberg.9.jpg>

Dentro de un período glacial las temperaturas van subiendo y bajando a intervalos de decenas de miles de años. En la actualidad, desde hace unos 12,000 años, estamos en un período interglacial cálido (dentro de la glaciación del Cuaternario), en el que las mediciones en los inlandsis y los glaciares de montaña indican una progresiva disminución de su tamaño. El período cálido anterior, similar al actual, sucedió hace algo más de 100,000 años. Son sólo unos grados los que hacen la diferencia en la temperatura media entre un periodo cálido y otro frío. Pueden ser cambios de

tan sólo unos 4 a 7°C en regiones tropicales, pero su efecto es que los glaciares avanzan hacia el ecuador o retroceden miles de kilómetros. Estos cambios en la masa de hielos afectan al nivel del mar que puede subir o bajar varias decenas de metros, a los caudales de los ríos, a la distribución de las lluvias y al clima en general. Por supuesto también afectan de forma importantísima a la fauna y la flora.



Figura 12. Nubes, lluvia, agua, nieve, hielo. Fotografía de la autora.

## Aguas atmosféricas

El agua que existe en la atmósfera se encuentra principalmente en estado de vapor, aunque también se encuentra como líquido y sólido. Las nubes se forman cuando este vapor de agua se condensa alrededor de una partícula de polvo, y según la temperatura del aire, forma gotas diminutas o cristales de hielo (Figura 12). Cuando chocan entre sí dentro de las nubes las diminutas gotas o cristales de agua, se juntan y forman gotas o cristales más grandes, y si estas gotas o cristales crecen mucho, caen en forma de lluvia, nieve o granizo. La proporción de vapor de agua en la atmósfera se conoce como humedad absoluta. Varía

con la temperatura del aire y la presión atmosférica, desde casi cero hasta 40g/m<sup>3</sup> de volumen.

### ¿Podemos vivir sin agua?

El hombre, los animales y las plantas necesitamos agua para vivir. Todos los estudios indican que la vida se originó en los océanos y salió de ellos cuando aprendió a desarrollar una piel impermeable, para retener el agua con ella. Somos, sin duda, animales de agua, sólo que la tenemos por dentro, no por fuera.

El agua forma el 70% de nuestro cuerpo, los animales y plantas también dependen de ella aunque cada día perdemos agua de tres formas, que hay que recuperar para no morir:

- Al respirar perdemos 0.2 litros diarios.
- Cuando sudamos, perdemos, como mínimo, 0.8 litros diarios; aunque esta cantidad es variable, ya que cuando la temperatura externa es alta o hacemos ejercicio sudamos más.
- Por la orina expulsamos 1.5 litros diarios.

Nuestro cuerpo necesita el agua para transportar los alimentos, para eliminar residuos, para regular la temperatura corporal, para realizar reacciones químicas y para disolver algunas sustancias. Para recuperar el agua que hemos perdido, debemos:

- Consumir alimentos, que al estar también formados en su mayor parte por agua, nos ayudan a recuperar cuando menos alrededor de un litro diario.
- Con las bebidas que ingerimos debemos cuando menos recuperar un litro y medio, aunque, en el caso de que haga mucho calor o de que practiquemos algún deporte, debemos beber más cantidad.

Además, utilizamos agua para realizar numerosas actividades:

1. La agricultura y la ganadería consumen el 75 % del agua total utilizada por la sociedad.
2. En la industria también se consume agua.

3. En el hogar se consume agua para la cocina, limpieza, higiene, etcétera.
4. El agua también se utiliza como medio de transporte y diversión (Figura 13).
5. Las centrales hidroeléctricas utilizan agua almacenada en embalses para obtener energía eléctrica, etc.

Así, en nuestra sociedad se consumen unos 275 litros de agua diarios por persona. Vivimos en un clima semiárido, donde las lluvias no son muy abundantes. Además suele llover de manera torrencial y el agua de estas lluvias intensas no se puede almacenar para aprovecharla. Por lo tanto, todos debemos estar concienciados de la importancia que tiene el ahorro del agua, ya que ésta es un recurso vital y escaso.

De este modo, y debido a muchos de los usos que hacemos del agua, muchas veces la contaminamos, de forma que no puede volver a utilizarse. Por esto debemos tratar de no contaminarla y, además, se deben construir plantas depuradoras de agua que la limpien de residuos para que pueda ser reutilizada.

### El agua potable

El agua pura no se encuentra en forma natural porque está normalmente contaminada por el aire y el suelo. Las impurezas que tiene el agua pueden ser orgánicas y/o inorgánicas, ya sea disueltas, o en forma de material particulado. Estas impurezas pueden provenir de muchos sitios, como de la degradación biológica de sustancias orgánicas que producen ácidos grasos, carbohidratos, aminoácidos e hidrocarburos; de sustancias inorgánicas como metales tóxicos, material particulado como arcillas y sedimentos, y de microorganismos como bacterias, virus y protozoos. Los contaminantes químicos comúnmente son metales pesados como hierro, manganeso, plomo, mercurio, arsénico, cobre, cinc; compuestos nitrogenados tales como amoníaco, nitritos y nitratos; carbonato o bicar-



Figura 13. Agua como medio de transporte y diversión. Fotografías de la autora.

bonato de calcio y magnesio; aniones como cloruro, fluoruro, sulfato y silicatos, y las mencionadas sustancias orgánicas. Aparte de estas sustancias, existen otros contaminantes de carácter antropogénico tales como cianuros, fenoles, cromo y detergentes.

Debemos cuidar el agua ya que su explotación y falta de cuidado han hecho que se esté convirtiendo en un bien escaso, al no cesar el aumento en el consumo como resultado del crecimiento poblacional y por el incremento del nivel de vida, en muchos países industrializados, especialmente. Por ejemplo, en el tercer mundo, el consumo medio de agua por habitante es del orden de 50 litros diarios, mientras que en las naciones industrializadas sobrepasa los 500 litros por día (estos datos incluyen todos los usos). Finalmente, podemos concluir que de toda el agua que hay en la hidrósfera, es muy poca el *agua potable*, de aquí que sea importantísimo el no malgastarla y procurar no contaminarla, porque de ella depende nuestro futuro, y el de todos los seres vivos del planeta.

## La Tierra: Biología

---

# La diversidad biológica de nuestro planeta

### Introducción

Los seres vivos, tal y como los conocemos actualmente, son un fenómeno local, posiblemente restringido a la superficie del tercer planeta de nuestro sistema solar, la Tierra. Los organismos vivos representan un componente importante de la Tierra, donde han existido desde hace casi 4000 millones de años. En los últimos años, varias misiones espaciales de la NASA han explorado otros planetas de nuestro sistema solar en busca de vida y hasta la fecha no se han encontrado evidencias que indiquen la existencia de otras formas de vida. Estas misiones espaciales pudieran dar la impresión errónea de que ya conocemos a todos los seres vivos que habitan nuestro planeta. No hay duda de que encontrar vida en otros planetas tendría enormes implicaciones biológicas, así como consecuencias importantes sobre nuestra visión del universo. Sin embargo, la realidad es que el conocimiento sobre la riqueza biológica de nuestro planeta es todavía muy limitado. En este artículo se pretende hacer una breve

### Bibliografía

- Kennett, J.P., 1982. *Marine Geology*. Prentice Hall, INC., Englewood Cliffs, N.J. 813 pp.
- The Hydrologic Cycle: online meteorology guide  
<http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/03AtmHidr/130Hidr.htm>
- <http://www.fq.uh.cu/dpto/qg/geografia/quimica/sdDistribucionAgua.htm>
- <http://www.physicalgeography.net/>
- Ritter, M. E. *The Physical Environment: an Introduction to Physical Geography*. 2006.  
<http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/>  
<http://www.tecnun.es/>
- Water - Wikipedia, the free encyclopedia

### Autora

*María Amabel Ortega-Rivera, Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM; amabel@servidor.unam.mx*

semblanza acerca de dicho conocimiento. Empezamos definiendo lo que es la biósfera y qué son los seres vivos. Luego presentamos un breve esbozo sobre los sistemas de clasificación biológica para luego discutir las estimaciones de la riqueza biológica de nuestro planeta. Finalmente presentamos un resumen de los atributos de los países que concentran la mayor diversidad biológica de nuestro planeta.

### La biósfera

La biósfera es el componente de nuestro planeta que contiene a los seres vivos. Incluye la superficie del planeta donde habitan todos los organismos y la parte del ambiente físico que los sustenta. Este espacio incluye la hidrósfera, el suelo, la parte superior de la litósfera y la parte inferior de la atmósfera. Su extensión incluye desde las profundidades de los océanos (Figura 1) hasta varios kilómetros por arriba del nivel del mar. Sin embargo, la biósfera no es homogénea, ni sus fronteras están claramente delimitadas. Por ejemplo, las esporas de bacterias y otras formas latentes de vida se dispersan casi por todas partes, incluyendo los polos, a varios kilómetros de altura en la atmósfera y aún en rocas a profundidades de kilómetros en la litosfera. Las interacciones entre la biósfera y los demás componentes de nuestro planeta son realmente recíprocas. La

parte no viva de la biósfera provee las condiciones necesarias para la vida y afecta significativamente a la distribución de los seres vivos. Por otra parte, sabemos que la estructura y composición de la parte no viva de nuestro planeta ha sido afectada profundamente por los seres vivos a través del tiempo. Por ejemplo, el contenido de oxígeno libre en la atmósfera es en gran medida el producto de la fotosíntesis de bacterias que empezaron a liberarlo desde hace más de 2000 millones de años. Esta influencia notable de los seres vivos en el ambiente hace que la biósfera sea un rasgo distintivo de nuestro planeta.



*Figura 1. Gorgonias blancas (Eunicella singularis). Las gorgonias pertenecen al Phylum Cnidaria y a la clase Anthozoa. Las gorgonias son colonias de pequeños animales llamados pólipos, que comparten alimento y soporte en una estructura hecha por ellos mismos. Estos animales viven ligados al fondo rocoso del mar y tienen apariencia de arbusto ramificado. Foto © Miquel Pontes (<http://marenostrum.org>), reproducida con su permiso.*

## ¿Qué son los seres vivos?

Todos sabemos que las rocas y el acero son diferentes de las aves, las plantas y los seres humanos. Sin embargo, no es fácil definir con precisión ni demarcar claramente los límites entre lo vivo y lo no-vivo. Nuestros antepasados veían espíritus y dioses en su entorno, y adjudicaban a los seres vivos un espíritu vital que no tenía la materia no-viva. Esta visión del mundo (vitalismo) distinguía la materia "animada" de la materia "inanimada", usando el criterio del espíritu vital que se creía que daba vida y movimiento a los seres vivos. En contraste, el mecanicismo, derivado de la visión Cartesiana del cosmos como una máquina, ha intentado ver a los seres vivos como máquinas y reducir la explicación de lo vivo a los principios de la

física y la química. En la actualidad, la visión vitalista ha sido descartada y se acepta que los seres vivos obedecen a los principios de la física y química. La tradición mecanicista y reduccionista ha permitido entender muchos de los fenómenos físicos y químicos que explican el funcionamiento de los organismos, aunque, justo es decirlo, no ha podido explicar en su totalidad su funcionamiento. Es por esto que ninguno de estos extremos (vitalización de la materia contra mecanización de la vida) ha dejado completamente satisfechos a muchos biólogos de nuestro tiempo.

Desde el punto de vista biológico, existen una serie de atributos emergentes que distinguen a los seres vivos. Los seres vivos tienen una historia evolutiva común, son sistemas abiertos, homeostáticos, con estructura celular y con la capacidad de reproducirse. Todos los organismos vivos descienden de otros seres vivos que se han originado a lo largo de la historia de nuestro planeta. Los seres vivos intercambian sustancias y energía con el medio externo y funcionan como sistemas abiertos. Durante el proceso de intercambio de energía y materiales con el medio externo, los organismos son capaces de mantener un medio interno estable; es decir son homeostáticos. Los seres vivos tienen la capacidad de autorregulación, ya que las reacciones químicas que ocurren en su interior son coordinadas en el tiempo y el espacio, de forma ordenada. Uno de los principios fundamentales de la biología es que la mayoría de los seres vivos están formados por una o más unidades similares conocidas como células. Estas unidades son como los ladrillos de lo que están contruidos los seres vivos, y ponen en evidencia la uniformidad de todos los organismos. Finalmente, uno de los atributos cruciales de los organismos es su capacidad de autorreproducirse, de transmitir información a su descendencia y así generar nuevos organismos con sus mismas características. La reproducción de los seres vivos puede ser desde algo tan simple como la división en dos de una bacteria, hasta algo tan complejo como la fecundación, desarrollo y metamorfosis de un anfibio. Uno de los grandes descubrimientos del siglo XX fue el conocimiento de las bases químicas de la herencia. El descubrimiento de la estructura de doble cadena de la molécula del ácido desoxirribonucleico (ADN) y la forma en que se replica, permitió entender cómo es que la información genética está codificada en la secuencia de nucleótidos del ADN, cómo se mantiene, cómo cambia y cómo se transmite de padres a hijos.

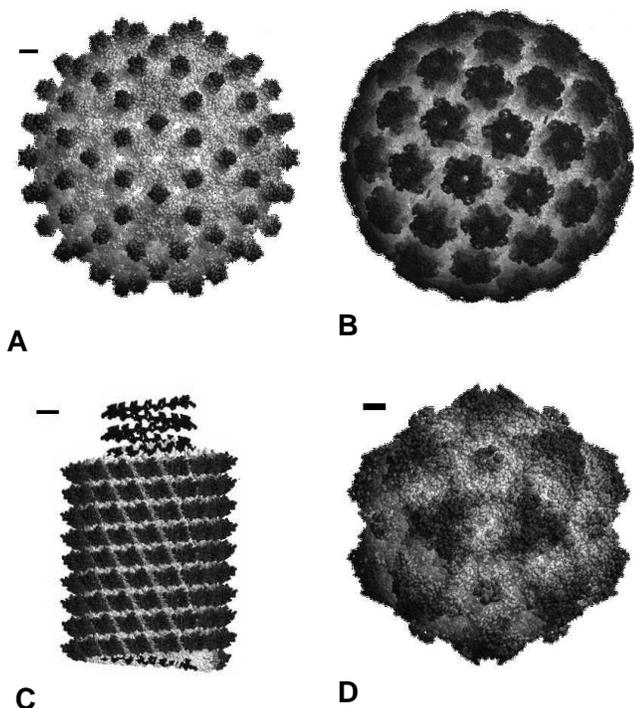


Figura 2. Imágenes que muestran la forma y la estructura de varios tipos de virus. Las imágenes fueron creadas a partir de datos de cristalografía de rayos X por el Dr. Jean-Yves Sgro, del Instituto de Virología Molecular de la Universidad de Wisconsin en Madison (<http://virology.wisc.edu/virusworld>) y se reproducen con su permiso. A.- Virus de la Hepatitis B (Hepadnaviridae) PBD ID: 1QGT, B.- Virus del Papiloma humano (Papillomaviridae) PBD ID: 1LOT, C.- Virus del mosaico del tabaco (Tobamovirus) PBD ID: 1VTM, D.- Parvovirus canino (Parvoviridae) PBD ID: 3DPV. Escala: las barras indican una longitud de 20Å. Un angstrom (Å) es igual a  $1 \times 10^{-7}$  milímetros; es decir es una diezmillonésima parte de un milímetro.

La gran mayoría de los seres vivos están formados por células. Los únicos organismos conocidos que no están constituidos de células o conjuntos de células son los virus. Estos organismos existen en el límite de la mayoría de las definiciones de lo que son los seres vivos. Los virus (Figura 2) son partículas consistentes de ácidos nucleicos (ADN o ARN) y proteínas, mucho más pequeñas que las bacterias, que solo se pueden reproducir en el interior de otras células vivas y son totalmente inertes fuera de células donde pueden persistir por muchos años en forma cristalizada. No obstante la excepción de los virus, casi todos los seres vivos tienen una estructura celular. A mediados del siglo XX se reconoció una distinción fundamental entre dos tipos de organización celular: células procarióticas y células eucarióticas (Figura 3). En las células

procarióticas, el material genético (ADN) se encuentra libre en su interior. En contraste, en las células eucarióticas, el material genético se encuentra asociado a proteínas y organizado en cromosomas, los cuales a su vez se localizan en el interior de un núcleo rodeado de una membrana. En estas células también existen compartimentos especializados como las mitocondrias y los cloroplastos, los cuales son de origen procarionte y tienen su propio ADN. Sobre la base de esta distinción en la organización celular, se reconoce que los seres vivos pueden dividirse en organismos procariontes y eucariontes.

### Sistemas de clasificación biológica

Los seres humanos tendemos a ordenar y organizar los objetos que nos rodean. La sistemática es la rama de la biología encargada de describir y organizar la diversidad biológica. La unidad básica del sistema de clasificación biológica es la especie. Las especies son tipos diferentes de organismos y una de las definiciones más usadas fue la propuesta por Ernst Mayr con el nombre de concepto biológico de especie. Esta definición plantea que una especie es un grupo de poblaciones naturales cuyos individuos se cruzan entre sí de manera real o potencial y que están reproductivamente aislados de otros grupos. Bajo esta definición, si los tigres no se pueden cruzar con los leones, los consideramos como miembros de especies diferentes.

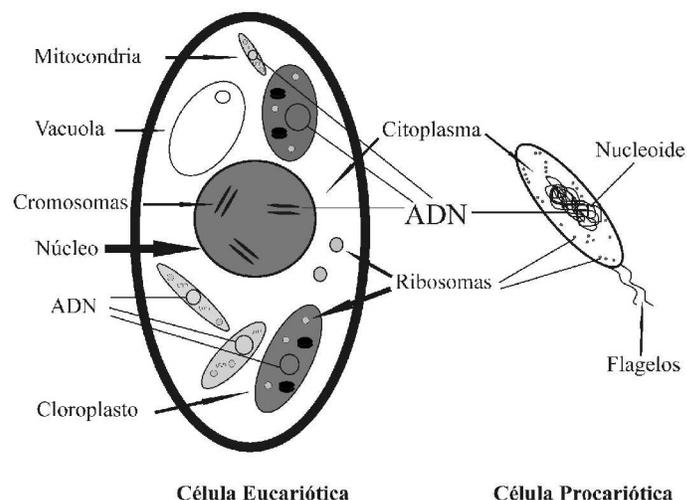


Figura 3. Esquema representativo de una célula eucariótica (con núcleo verdadero) y de una célula procariótica (sin núcleo).

Durante el siglo XVIII, Carlos Linneo propuso un sistema para describir y organizar la diversidad biológica. Esta propuesta consistió en un sistema de nomenclatura binomial y un esquema jerárquico de

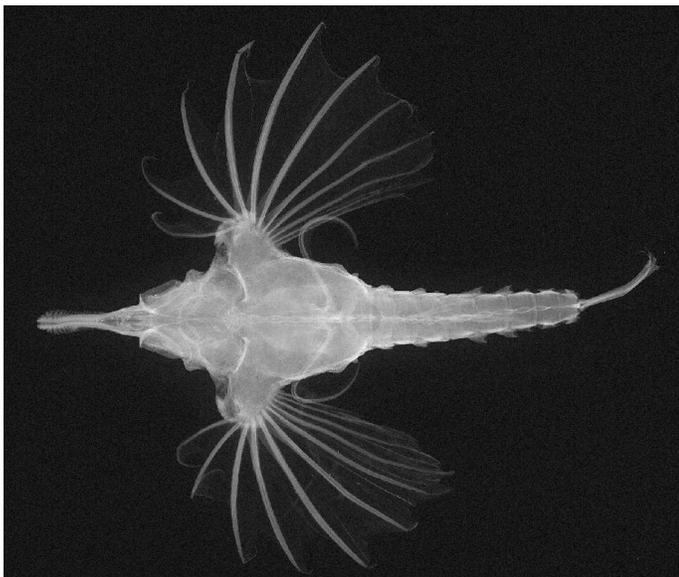


Figura 4. Radiografía digital de *Eurypegasus papilio*. Este pez pertenece a la familia *Pegasidae* y a la clase *Actinopterygii*. Vive en las aguas del Pacífico (Hawái) y está en la lista roja de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Foto © Sandra J. Raredon, de la División de Peces de la Institución Smithsonian, reproducida con su permiso.

organización de los seres vivos. En este sistema, el nombre científico de las especies se designa por un nombre genérico y un adjetivo modificador. El esquema de Linneo es jerárquico, ya que incluye grupos dentro de grupos. Por ejemplo, las especies se ubican dentro de géneros, los géneros en familias, y así sucesivamente en órdenes, clases, phyla y reinos. En la época de Linneo solo se reconocían dos reinos para clasificar a los seres vivos macroscópicos más comunes, que son las plantas y los animales.

La clasificación general de los seres vivos ha cambiado y seguirá cambiando como consecuencia del nuevo conocimiento generado sobre sus características y su historia evolutiva. Durante muchos años solo se reconocieron dos reinos (animales y plantas) y por ende la biología se dividía, de acuerdo a los organismos de estudio, en zoología y botánica. Con el desarrollo de lentes y el microscopio se descubrieron una gran cantidad de microorganismos, lo cual ponía en aprietos al sistema de solo dos reinos. A finales del siglo XIX se postuló un tercer reino, el de los Protistas, para reconocer a los microorganismos. Durante la segunda mitad del siglo XX se propuso un sistema de clasificación de los seres vivos compuesto de cinco reinos: *Monera* o *Procariota* que incluye a las bacterias, *Protoctista* o *Protista* para algas y protozoos, *Fungi* para

hongos y líquenes, *Animalia* para animales vertebrados (Figura 4) e invertebrados (Figuras 5 y 6) y *Plantae* para musgos, helechos, gimnospermas y angiospermas.

La sistemática intenta ordenar la diversidad biológica basada en el conocimiento de las relaciones evolutivas entre los diferentes grupos de organismos. Estas relaciones se representan en forma de árboles filogenéticos que muestran hipótesis sobre el proceso de ramificación y divergencia que ha seguido la evolución de las especies. Históricamente, la sistemática ha empleado caracteres morfológicos y anatómicos para postular estas hipótesis. Sin embargo, el uso de secuencias de ADN ha resultado una herramienta muy poderosa que ha permitido inferir la historia evolutiva de cualquier grupo, aun para grupos muy diferentes. El análisis de las secuencias de nucleótidos de la unidad pequeña del gen que especifica el ARN ribosomal ha sido particularmente útil. Esta es una molécula universal, muy importante en la síntesis de proteínas de todas las células y muy conservada (es decir, cambia muy poco) a lo largo de la evolución. En 1990, C. R. Woese y colaboradores analizaron la variabilidad de las secuencias de este gen en organismos representativos de todos los grupos existentes en nuestro planeta y el resultado mostró la existencia de tres grandes grupos. El árbol filogenético resultante (Figura 7) muestra que existen dos tipos de procariontes: las



Figura 5. Cangrejo ermitaño (*Dardanus calidus*). Los cangrejos pertenecen al Phylum *Arthropoda*; es decir, animales con apéndices articulados, y a la clase *Crustacea*. Los crustáceos son fundamentalmente acuáticos, habitan tanto en el medio marino como en agua dulce, y algunos han colonizado el medio terrestre. Se caracterizan por tener dos pares de antenas. Foto © Miquel Pontes (<http://marenostrum.org>), reproducida con su permiso.



Figura 6. *Serpula roja* (*Serpula vermicularis*). La *serpula roja* es un anélido (*Phylum Annelida*) marino que pertenece a la clase *Polychaeta*. Viven en grupos dentro de tubos calcáreos sobre rocas o conchas en aguas poco profundas y calmadas. Foto © Miquel Pontes (<http://marenostrum.org>), reproducida con su permiso.

bacterias y las arqueobacterias. De igual forma, el árbol muestra que a nivel bioquímico y a juzgar por la divergencia de este gen, las bacterias y las arqueobacterias son tan diferentes entre sí como de los eucariontes. La conclusión de Woese y colaboradores fue que todos los organismos pueden ser asignados a tres formas de vida o dominios: bacterias, arqueobacterias y eucariontes.

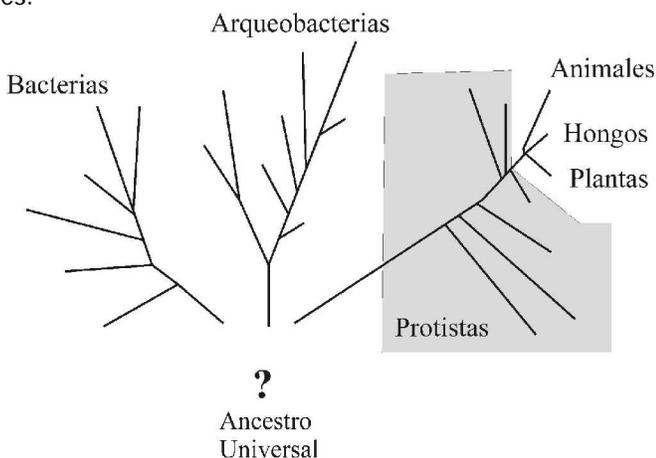


Figura 7. Esquema global de las relaciones evolutivas entre los seres vivos visto como árbol filogenético. El esquema es una versión simplificada del árbol filogenético derivado del análisis comparativo de secuencias de la subunidad pequeña (16S) de la molécula de ARN ribosomal de grupos representativos de todos los seres vivos, que pretende mostrar la estructura más profunda de la diversidad biológica. Modificado de: Woese, C.R., O. Kandler y L.M. Wheelis, 1990. *Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria and Eukarya. Proceedings of the National Academy of Sciences* 87: 4576-4579.

La distancia entre linajes, medida como la divergencia en las secuencias del gen del ARN ribosomal y la secuencia de ramificación a lo largo de la evolución, ha sido representada como el árbol filogenético universal. La raíz del árbol y la secuencia de ramificación basal es un asunto polémico. Dentro del dominio *Eukarya*, los hongos, animales y plantas forman ramas aparentemente insignificantes en comparación con la diversidad y divergencia de los protistas. Este grupo (protista) en realidad es un nombre que agrupa a la gran diversidad de eucariontes que carecen de los rasgos distintivos de hongos, animales y plantas. En este nuevo esquema de clasificación, el dominio se convierte en una categoría superior a la de reino y todos los organismos se clasifican en *Bacteria*, *Archaea* y *Eukarya*. El dominio *Eukarya* contiene a los reinos de los animales, las plantas, los hongos y los protistas. En cambio el antiguo reino Procariota cambió a dos dominios (*Bacteria* y *Archaea*) y es muy probable que los nuevos cambios en los sistemas de clasificación biológica se den en estos grupos de organismos. La Figura 8 muestra un resumen simplificado de nuestro conocimiento sobre los principales episodios de la historia y diversificación de los seres vivos, visto como árbol filogenético con escala temporal.

### Estimaciones de la riqueza biológica conocida de nuestro planeta

Cualquier intento por estimar el número total de especies que existen en nuestro planeta tiene que ser visto con escepticismo. Hay que distinguir claramente las estimaciones del número de especies conocidas que ya han sido descritas de las estimaciones del número total de especies que se cree que existen en nuestro planeta. Linneo por ejemplo incluyó cerca de 9000 especies conocidas en su sistema de clasificación publicado en 1758. Cada año se describen nuevas especies a las cuales se les designa un nuevo nombre científico, y con esto aumenta el número de especies conocidas. En las últimas décadas se estima que se vienen describiendo alrededor de 10,000 nuevas especies por año, diferentes a las ya conocidas. Para grupos taxonómicos donde los individuos son muy visibles, que tienen importancia económica o que llaman mucho la atención (por ejemplo, mamíferos y aves), el número de especies que se describen cada año no es muy grande. Se estima que en promedio se describen alrededor de 25 nuevas especies de mamíferos y 3 de aves cada año. En cambio, para las

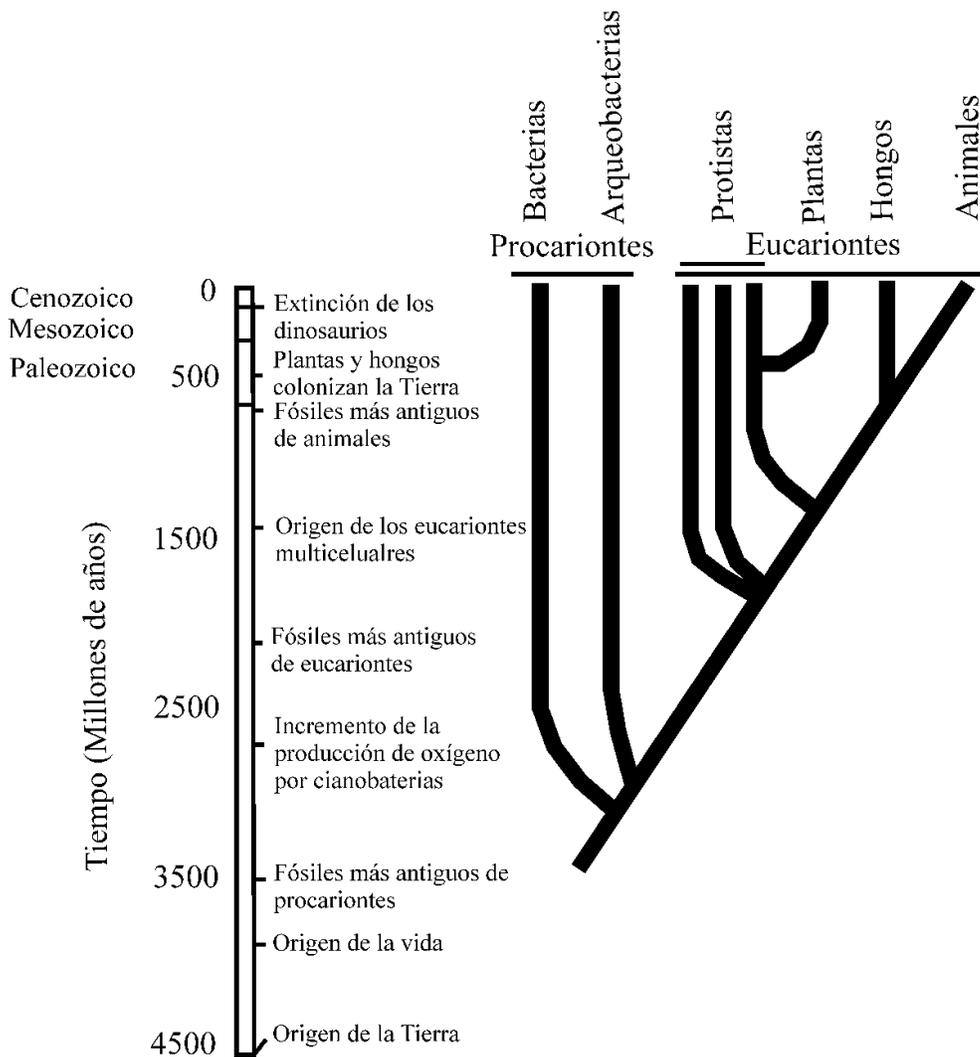


Figura 8. Diagrama que muestra los principales episodios sobre el origen, historia y diversificación de los seres vivos en forma de árbol filogenético. La ubicación temporal de los episodios se basa en evidencia fósil. Modificado de: Campbell, N.A. y J.B. Reece, 2002. *Biology. Sixth Edition. Benjamin Cummings. San Francisco.*

especies que no son visibles al ojo humano y no llaman la atención (mayoría de invertebrados y todos los microorganismos), el número de nuevas especies que se describen cada año es mucho mayor. La exploración de regiones antes inaccesibles (tropicales o marinas) y el uso de mejores métodos de muestreo, así como de nuevas técnicas moleculares, generalmente llevan al descubrimiento de un número sorprendente de nuevas especies.

Las estimaciones recientes del número total de especies que han sido descritas en nuestro planeta indican aproximadamente 1, 750,000 especies (ver Tabla 1). Lo primero que llama la atención de esta tabla es que la inmensa mayoría (99%) de las especies que se han descrito pertenecen al dominio *Eukarya*. Dentro de este dominio, la gran mayoría pertenecen al reino *Animalia* (1, 225,332 especies, 72% del total) y dentro de este

reino los invertebrados son el grupo más numeroso. En contraste, en el reino *Plantae* se conocen 270,000 especies (16% del total), en el reino *Protoctista* se conocen 80,000 especies (5% del total) y en el reino *Fungi* se conocen 72,000 especies (4% del total). Finalmente, los dominios *Bacteria* y *Archaea* están representados solo por 10,000 y 175 especies (< 1% del total), respectivamente. Es por demás interesante contrastar la extraordinaria riqueza de especies del dominio *Eukarya* (Tabla 1) con la gran diversidad molecular de los dominios *Bacteria* y *Archaea* en el árbol mostrado en la Figura 7. El número de especies descritas debe ser visto con reserva puesto que inevitablemente cada año se describen nuevas especies, o algunas especies que se creían diferentes resultan ser iguales a otras (sinonimia), y por lo tanto estas estimaciones son inexactas. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, estos números nos dan una idea de la magnitud de la riqueza biológica conocida de nuestro planeta.

La estimación del número total de especies que se cree que habitan en nuestro planeta se basa en diferentes procedimientos que usan diversas suposiciones sobre la diversidad biológica conocida. Por ejemplo, existen procedimientos estadísticos que proyectan el número total que se esperaría dado el número conocido de un grupo y la tasa a la que se descubren nuevas especies. Según este procedimiento el número total de aves que existen en nuestro planeta está muy cercano al número conocido actualmente dado que cada año se describen menos especies nuevas. Es decir, la curva de acumulación de nuevas especies se está estabilizando porque la descripción de especies está llegando a un punto en el que ya no se descubren nuevas. En cambio para grupos como los insectos, la tasa a la que se describen nuevas especies es de tal magnitud que permite proyectar que el

Dominio	Reinos de eucariontes	Número de especies descritas	Número estimado del total global
Archea		175	¿?
Bacteria		10,000	¿?
Eukarya			
	Animalia		
	Vertebrados (total)	52,500	55,000
	Mamíferos	4,630	
	Aves	9,750	
	Reptiles	8,002	
	Anfibios	4,950	
	Peces	25,000	
	Mandibulata (Insectos y Miriápodos)	963,000	8, 000,000
	Chelicerata (Arácnidos y otros)	75,000	750,000
	Mollusca	70,000	200,000
	Crustacea	40,000	150,000
	Nematoda	25,000	400,000
	Fungi	72,000	1, 500,000
	Plantae	270,000	320,000
	Protoctista	80,000	600,000
<b>TOTAL</b>		<b>1, 750,000</b>	<b>14, 000,000</b>

Tabla 1. Número estimado de las especies conocidas y del total que se cree que existen en nuestro planeta. Modificado de: Groombridge, B. y M.D. Jenkins. 2002. *World Atlas of Biodiversity: Earth living resources in the 21st century*. University of California Press, Berkeley.

número total en nuestro planeta es de una magnitud muy superior al número conocido actualmente. Por otra parte, también se ha calculado la riqueza total usando las estimaciones de regiones donde la diversidad biológica está bien documentada, para luego proyectarla a nivel mundial. Por ejemplo, en países como Inglaterra o Suecia se conocen muy bien el número de especies de plantas, de insectos y de hongos, y si estos datos se proyectan al área total de la superficie de nuestro planeta, se obtiene una estimación cruda de la riqueza total para esos grupos. Este tipo de procedimientos se han empleado para calcular el número total de especies (14 millones) que se cree que habitan en nuestro planeta y que se reportan en la Tabla 1. La comparación del número de especies conocidas con el número total muestra patrones reveladores. Por un lado, el número total estimado de vertebrados y plantas no está muy alejado del número de especies conocidas en la actualidad. Según estos datos, conocemos entre el 84% y el 95% de las plantas y vertebrados que existen en nuestro planeta. En contraste, para los invertebrados (12%), hongos (5%) y protoctistas (13%), el número conocido de especies representa un porcentaje pequeño del total que se cree que existe en nuestro

planeta. La situación para los dominios *Bacteria* y *Archaea* es todavía peor ya que no contamos con estimaciones confiables de la riqueza total que pueda existir en nuestro planeta. Si tomamos como válidos el total de especies descritas y el estimado del total global, esto implica que solo conocemos el 12% de la riqueza biológica de nuestro planeta. A pesar de sus limitaciones, estos datos revelan que nuestro conocimiento sobre la diversidad biológica de nuestro planeta es todavía muy pobre, sobre todo para los organismos microscópicos.

La distribución de la diversidad biológica de nuestro planeta no es homogénea. Los ambientes terrestres ocupan alrededor del 29% de nuestro planeta, mientras que los ambientes marinos ocupan el 71%. La distribución de la diversidad biológica entre los componentes terrestres y marinos de la biósfera es desigual. Se estima que en los océanos habitan alrededor de 250,000 especies conocidas mientras que en los ambientes terrestres habitan un millón y medio de especies. En contraste, la diversidad filética (número de clases y phyla de organismos) es mayor en los ambientes marinos que en los terrestres. Se cree que la razón de la mayor diversidad filética en los ambientes mari-

País	Plantas	Mamíferos	Aves	Reptiles	Anfibios	Peces dulceacuícolas
Brasil	~50,000-56,000 (~16,500-18,500)	524 (131)	1622 (>191)	468 (172)	517 (294)	>3000
Indonesia	~37,000 (14,800-18,500)	515 (201)	1531 (397)	511 (150)	270 (100)	1400
Colombia	45,000-51,000 (15,000-17,000)	456 (28)	1815 (>142)	520 (97)	583 (367)	>1500
México	18,000-30,000 (10,000-15,000)	450 (140)	1050 (125)	717 (368)	284 (169)	468
Australia	15,638 (14,458)	282 (210)	751 (355)	755 (616)	196 (169)	183
Madagascar	11,000-12,000 (8,800-9,600)	105 (77)	253 (103)	300 (274)	178 (176)	75
China	27,100-30,000 (~10,000)	499 (77)	1244 (99)	387 (133)	274 (175)	1010
Filipinas	8,000-12,000 (3,800-6,000)	201 (116)	556 (183)	193 (131)	63 (44)	330
India	>17,000 (7,025-7,875)	350 (44)	1258 (52)	408 (187)	206 (110)	750
Perú	18,000-20,000 (5,356)	344 (46)	1703 (109)	298 (98)	241 (~89)	855

Tabla 2. Riqueza de especies y endemismos (entre paréntesis) de plantas y cinco grupos de vertebrados en los diez países más megadiversos del mundo. Modificado de: Mittermeier, R., AC. Goettsch-Mittermeier y P. Robles-Gil. 1997. Megadiversidad: Los países biológicamente más ricos del mundo. Agrupación Sierra Madre, México D. F.

nos se debe a que la mayor parte de los diseños anatómicos que definen a los grupos se originaron en el mar y de ahí colonizaron los ambientes terrestres. Por otra parte se cree que la menor diversidad de especies en los ambientes marinos tiene que ver con las propiedades del agua, en particular con su gran capacidad de transmitir calor y la de mezclarse. Debido a esto, los ambientes marinos tienden a tener menor variación espacial y temporal en las características físicas que los ambientes terrestres, donde la diversidad ecológica es mayor. Por ejemplo, la temperatura y la humedad varían considerablemente desde las selvas tropicales a los polos, generando gradientes latitudinales de diversidad. Se cree que la mayor diversidad ecológica de los ambientes terrestres está asociada a mayores tasas de especiación y por eso la diversidad terrestre es mayor que la marina.

### Países megadiversos

La distribución de la diversidad biológica entre los países es muy heterogénea. Existe un conjunto de 17 países donde la riqueza biológica está sobrerrepresentada y colectivamente concentran entre el 66 y 75% de la biodiversidad del planeta. Estos países biológica-

mente más ricos del mundo reciben el nombre de países megadiversos y comparten una serie de atributos como: a) poseen una gran riqueza de especies en sus territorios y un porcentaje considerable de las especies son endémicas. Esto quiere decir que muchas de esas especies solo se encuentran en esos países; b) poseen una gran diversidad ecológica; es decir, estos países tienen una gran variedad de ecosistemas o tipos de vegetación; c) tienen selvas tropicales y ecosistemas marinos; d) poseen una gran diversidad cultural. En estos países emergieron una buena parte de las civilizaciones antiguas y todavía poseen una gran diversidad cultural representada por grupos indígenas. En la tabla 2 se presenta una lista de los 10 países de mayor megadiversidad ordenados de mayor a menor, de acuerdo a la riqueza de plantas y vertebrados. En esta tabla se puede ver que Brasil, Indonesia, Colombia, México y Australia son los cinco países más diversos del mundo.

Estos países megadiversos enfrentan diversos dilemas. Por un lado, la mayoría de ellos tienen serios problemas socioeconómicos y enfrentan la responsabilidad de atender y satisfacer las demandas de bienestar de los seres humanos que en ellos habitan. Por

otro lado, se tiene la responsabilidad de conservar la extraordinaria riqueza biológica que existe en sus territorios. Los ecosistemas naturales proveen de servicios cruciales para las sociedades humanas. Muchos ecosistemas naturales están sufriendo serias alteraciones como consecuencia de la deforestación para la expansión de la agricultura y ganadería y por la sobreexplotación de las especies. La destrucción de hábitats y la sobreexplotación amenazan seriamente a muchas especies (conocidas y por conocer) y a los servicios que prestan los ecosistemas. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha declarado al año 2008 como el año de la Tierra para promover la reflexión sobre el estado actual de nuestro planeta. En un país megadiverso y con enorme desigualdad social como México, este año pudiera ser una excelente oportunidad para reflexionar sobre las alternativas que tenemos para resolver el dilema de los países megadiversos. Esta reflexión tendría que incluir la imperiosa necesidad de invertir en infraestructura educativa y científica que

nos permita generar los recursos humanos y las herramientas para enfrentar este serio problema.

## Autor

*Francisco Molina Freaner, Instituto de Ecología UNAM, Hermosillo, Sonora; freaner@servidor.unam.mx*

## Lecturas recomendadas

- Campbell, N. A. y J. B. Reece. 2002. *Biology*. Sixth Edition. Benjamin Cummings. San Francisco.
- Curtis, H. y N. S. Barnes. 2000. *Biología*. Sexta Edición. Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires, Argentina.
- Groombridge, B. y M. D. Jenkins. 2002. *World Atlas of Biodiversity*. University of California Press. Berkeley.
- Margulis, L. y D. Sagan. 1995. *What is Life?* Weidenfeld & Nicolson. London.
- Sarukhán, J. y R. Dirzo. 2001. *Biodiversity-rich countries*. En: *Encyclopedia of Biodiversity*. S. A. Levin (Editor). Volume 1. Academic Press. San Diego.

## Ciencias ambientales

---

# Las inundaciones históricas de la ciudad de Guanajuato

“Si no quieres repetir el pasado, estúdialo”  
Baruch Benedict Spinoza (1632-1677)

## Introducción

Las inundaciones originadas por el desbordamiento de ríos pueden ser frecuentes como parte del proceso natural evolutivo de un sistema fluvial. El efecto negativo de las inundaciones se debe a la existencia de asentamientos humanos en el cauce de ríos y la planicie de inundación de los mismos. La ciudad de Guanajuato se localiza en el límite sur de la mesa central mexicana y fue fundada en el siglo XVI, asentándose sobre la rivera del río Guanajuato. A lo largo de toda su historia la ciudad de Guanajuato fue afectada por múltiples inundaciones importantes y desastrosas, de las cuales hacemos cuenta, con el objeto de documen-

tar un ejemplo de ciudad vulnerable a a este tipo de fenómenos naturales.

La ciudad de Guanajuato debe su fundación a los vastos yacimientos de metales preciosos descubiertos en el siglo XVI. La minería es una pieza fundamental en la historia de Guanajuato antiguo, ya que originó que los primeros pobladores se asentaran entre las cañadas y la rivera del río Guanajuato, con el objeto de facilitarse el acceso al agua, vital para la subsistencia y la actividad de beneficio de minerales. Esta ciudad colonial, de más de 450 años de historia, guarda todo tipo de relatos e historias de la vida diaria, de la actividad minera o incluso de desastres naturales repetidos, tales como las inundaciones.

Una compilación de archivos históricos pone en evidencia un historial cargado de eventos de inundación que han causado pérdidas materiales y humanas. El periodo histórico mejor documentado es el comprendido entre 1704 y 1912 donde se reportan un total de 21 inundaciones (Tabla 1), denominadas como importantes o devastadoras de acuerdo a los daños materiales sufridos o por el número de vidas que se perdieron.

## Inundaciones importantes

De acuerdo a las crónicas del padre Lucio Marmolejo (1967), las inundaciones importantes fueron recurrentes en la zona centro de la ciudad de Guanajuato, afectando la plazuela del Baratillo, la zona del templo de San Diego, el templo de Belén, al grado que durante la inundación del año 1828 la parroquia de Belén se vio forzada a cerrar al culto. Dos de las inundaciones importantes reportan pérdidas humanas. La inundación del 8 de junio de 1704 es descrita textualmente por Marmolejo: “Este día, domingo, a las ocho de la noche, a consecuencia de un terrible aguacero, se desborda el río en el punto que hoy ocupa la calle Belén y arrastra en su corriente a dos niños pequeños. El cuerpo de uno de ellos se encontró hecho pedazos; del otro no pudo hallarse ni aun el cadáver”. Otra inundación importante data del 16 de junio de 1912, que Marmolejo describiría así: “Hoy en medio día se descarga sobre los vecinos minerales de Cata, Mellado y Valenciana, una manga de agua, alcanzando a esta ciudad un fuerte aguacero, aunque de poca duración; pero el río que bajó de los cerros de las referidas minas, y que viene a juntarse en la Calzada de Guanajuato con el río principal que baja de la Presa de la Olla y del Monte de San Nicolás, fue tan caudaloso, que no cabiendo en el cauce se desborda y retrocede por la calle del centro de la ciudad, originando una inundación desde el Puente de San Ignacio para el rumbo poniente. La creciente hizo dos víctimas que sorprendió sin tener medios ningunos de salvación”. Descripciones como las anteriores son frecuentes a lo largo de toda la historia de la ciudad de Guanajuato.

Inundación	Categoría	Inundación	Categoría
1704	Importante	1867	Devastadora
1741	Importante	1868	Importante
1760	Devastadora	1873	Devastadora
1770	Importante	1882	Importante
1772	Importante	1883	Importante
1780	Devastadora	1885	Importante
1794	Importante	1899	Importante
1795	Importante	1902	Importante
1804	Importante	1905	Devastadora
1828	Importante	1912	Importante
1834	Importante		

Tabla 1. Inundaciones históricas en la ciudad de Guanajuato en el periodo 1704-1912, compilado de diversas fuentes (Humboldt (1822), Antúnez (1964), Marmolejo (1967), Jáuregui de Cervantes (1998), Reza (2001), Guzmán-Segoviano (2005)). La clasificación de categoría es relativa: Importante (construcciones destruidas y 1 ó 2 pérdidas humanas), Devastadora (construcciones destruidas y más de 2 pérdidas humanas).

## Inundaciones devastadoras

Una de las inundaciones más devastadoras fue la del 27 de julio de 1780, que generó una gran pérdida para el sector minero, del cual dependía la vida laboral de la época. Según las descripciones hechas por Marmolejo (1967) y Guzmán-Segoviano (2005): “Terrible y devastadora inundación, que obliga a la ciudad de Guanajuato a lamentar nuevas y muy grandes desgracias”. La pérdida de vidas e intereses fue considerable. El templo de San Diego fue de nuevo devastado, introduciendo el agua cadáveres de hombres y animales en su recinto, dejándolo inservible, a tal grado que fue cerrado al culto. En la mina de Rayas, el arroyo que pasa por la población entró por la boca de la misma mina, la llenó en breves momentos, dejando sepultados a cientos de trabajadores que laboraban dentro.

La inundación devastadora del 1 de julio de 1905 es la más documentada, encontrándose archivos fotográficos en la colección Ing. Ponciano Aguilar, del archivo histórico de la Universidad de Guanajuato, periódicos de la época y diversas actas de cabildo. Guzmán-Segoviano (2005) realizó una compilación de información de la época, de donde obtuvimos parte de la siguiente descripción: “La tarde del 30 de junio la lluvia hizo desbordar el río Guanajuato que pronto se abalanzó sobre las calles de la ciudad, siendo las más afectadas Cantarranas, Puente del Rastro, Baratillo, Jardín Unión, Truco y Alonso. Ninguna persona murió hasta ese momento, registrándose solo pérdidas materiales en las casas y negocios ubicados en los lugares mencionados. El día siguiente parecía ser un día tranquilo

con un cielo azul y despejado de nubes. La población apenas se enteraba y se aterraba de los destrozos causados la tarde anterior; escaso fue el momento para sentirse tranquilos por la ausencia de más lluvia, pues la tarde del 1 de julio las nubes ennegrecidas se arremolinaron en la ciudad descargando con furia una tromba de aproximadamente una hora que inmediatamente tuvo terribles consecuencias: el agua prorrumplía por las bardas de la presa de San Renovado destrozando las escaleras que hacían flanco, y de la Presa de la Olla salía una monstruosa cascada que no tenía cabida en el túnel de saneamiento y pronto se desbordó sobre los jardines (ahora Parque Florencio Antillón)”.



*Figura 1. Destrozos de la ciudad de Guanajuato por la inundación de 1905 (plaza Allende). Note la marca del nivel máximo de la inundación en el extremo derecho de la fotografía. Fotografía de la colección Ponciano Aguilar-Dirección de Archivos y Fondos Históricos de la Universidad de Guanajuato.*

En su recorrido la corriente arrancaba los árboles desde la raíz, arrojándolos sobre las casas, aplastando techos, paredes, muros y bardas (Figura 1). En su cauce se iban mezclando muebles, piedras, ventanas, puertas, rieles, mulas y casas completas que se desplo- maban ante la humedad que las invadía. La inunda- ción del 1 de julio de 1905 dejó devastación y pérdidas humanas (Figura 2). Posteriormente la ciudad sufriría otras inundaciones, pero ninguna que se asemeje a ésta. En la actualidad la planicie aluvial del río Guana- juato presenta vestigios de algunas de las inundacio- nes históricas tales como la de 1905, reportados por Miranda-Avilés y colaboradores (2007).

## Causas y primeros intentos para mitigar las inundaciones en la ciudad de Guanajuato

En los inicios de los asentamientos de la ciudad de Guanajuato, las autoridades trataban de definir cuáles serían las reglas de higiene y salubridad que se llevarían acabo para que el número de defunciones causa- das por inundaciones fuera mínimo, por lo que presta- ron atención al riesgo que implicaba el asolvamiento del río Guanajuato, ya que las diferentes compañías mineras lo utilizaban para verter sus desechos. Las autoridades dispusieron que el cauce del río fuese limpiado anualmente para sacar escombros y basura. En ocasiones la autorización virreinal tardaba años y la limpia no se hacía, por lo que las consecuencias pronto se dejaban sentir causando el desbordamiento del río Guanajuato (Reza, 2001).

Después de la inundación del 2 de septiembre de 1772, las autoridades virreinales dan una orden de inicio de obras con carácter urgente (Marmolejo, 1967). El virrey don Martín de Mayorgas, con motivo de tales sucesos, envió a Guanajuato al científico don Joaquín Velázquez de León, quien para evitar los males causa- dos por las inundaciones, realizó un reconocimiento del río que atraviesa la ciudad e indicó que se previ- niera a los dueños de minas que evitaran asolvar las cañadas, pues ésta era en su concepto, una de las prin- cipales causas de las inundaciones. Dichas recomen- daciones jamás fueron acatadas.

Las obras que controlaron temporalmente las inun- daciones, fueron la presa de la Olla, concluida en el año de 1849 y la presa de Esperanza concluida en 1894. Posterior a la construcción de éstas, Guanajuato se vería asolada por más inundaciones como la de 1905.

Las inundaciones fueron originadas principalmente por lluvias extraordinarias en la Sierra de Guanajuato, y de acuerdo a diversos autores, una de las principales causas de las inundaciones fue la práctica del vaciado de jales mineros al lecho del río Guanajuato (Antúnez 1964; Humboldt 1822; Jáuregui de Cervantes 1998; Reza 2001). El vaciado de jales mineros al lecho del río provocó que el nivel base del mismo ascendiera gradualmente, disminuyendo de manera sustancial la capacidad del cauce principal, generando que los excedentes de agua inundaran y devastaran la ciudad de Guanajuato en múltiples ocasiones.



Figura 2. Fotografías de la inundación de 1905 en la plaza de la Unión (arriba) y en el barrio del Hinojo (abajo) de la ciudad de Guanajuato. Fotografías de la colección Ponciano Aguilar- Dirección de Archivos y Fondos Históricos de la Universidad de Guanajuato.

## Referencias

Antúñez, E.F. 1964. Monografía histórica y minera del Distrito Minero de Guanajuato, México, Consejo Nacio-

nal de Recursos Naturales no Renovables, publicación 17-E, 589 p.

Guzmán-Segoviano, E. M. 2005. La ruina de Guanajuato, Tesoro: Gaceta informativa de la dirección de archivos y fondos históricos, Universidad de Guanajuato, Año I, número 2, p. 1-3.

Humboldt, A. von 1822. Ensayo político sobre el reino de la Nueva España: México, Editorial Porrúa, S.A., quinta edición, 1991, 698 p.

Jáuregui de Cervantes, A. 1998. Relato histórico de Guanajuato, Guanajuato. Ediciones La Rana, Instituto de Cultura del Estado de Guanajuato, 189 p.

Marmolejo, L. 1967. Efemérides guanajuatenses o datos para formar la historia de la ciudad de Guanajuato. Obra escrita con los más auténticos e interesantes documentos por el presbítero Lucio Marmolejo, 4 tomos. Universidad de Guanajuato.

Miranda-Avilés R., Puy-Alquiza M. J., Ramos-Arroyo Y. R., Navarro-Barrera R. 2007. Distribución y evolución histórica de las terrazas fluviales del valle de Santa Teresa, Guanajuato, Investigaciones Geográficas, Boletín, 63, pp 93-104.

Reza A. L. 2001. Guanajuato y sus miasmas: higiene urbana y salud pública, 1792-1804, Dirección de Cultura y Educación de la Presidencia Municipal de Guanajuato, primera edición, 119 p.

## Autores

Miranda-Avilés R., Puy-Alquiza M. J., Martínez Reyes J.J., Zavala Ezquivel A., Quiroga Velásquez J.L., Facultad de Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, Ex-Hacienda de San Javier, C.P. 36020, Guanajuato, Gto.; [rmiranda@quijote.ugto.mx](mailto:rmiranda@quijote.ugto.mx)

## Botánica

# Las plantas del género *Ipomoea* en Sonora: características y usos

El género *Ipomoea* pertenece a la familia Convolvulaceae, comúnmente llamadas campanitas y conocidas también como "morning glory". Es el género más gran-

de de la familia, con aproximadamente 600 especies en todo el mundo. En México tenemos aproximadamente 135 especies y en Sonora se encuentra el 28 %, un porcentaje nada despreciable tratándose de un género de plantas de origen tropical.

Una parte de estas plantas son hierbas trepadoras anuales, esto es, que cumplen su ciclo de vida en una estación del año, casi siempre en verano. Aquí en Sonora es común verlas en nuestros jardines enredando sus delicados tallos en los cercos o sobre otras plan-

tas, con sus grandes flores en forma de embudo radial como campanitas, y muy atractivas para las abejas y mariposas por sus llamativos colores que van desde el blanco, rosa, azul, hasta púrpura en múltiples tonos. Pero si vas al campo, entonces podrás verlas trepando sobre cualquier arbusto, árbol o hasta sobre algunas choyas o cactáceas más grandes como la sinita, o la pitahaya. También las hay del tipo arbustivo y arbóreas como *Ipomoea arborescens*, que es un árbol de 5-15 m de altura, conocido por los sonorenses como "palo blanco" o "palo santo" (Figuras 1 y 2). Esta especie se caracteriza por su gran tronco liso de color blanco-plataado, florece en invierno y sus grandes flores blancas resaltan en el árbol aún sin hojas; es común verla en los cerros del Bachoco y en el Agualurca, al norte y al sur de Hermosillo, respectivamente, siendo el estado de Sonora su límite de distribución más septentrional. Crece en sitios húmedos, ya sea arroyos o pendientes orientadas hacia el norte.

Las hojas de este género son alternas, de formas muy variables, con los márgenes enteros o profundamente lobulados. El fruto es una cápsula de 1-4 semillas.

Las especies del género *Ipomoea* en Sonora y en el país generalmente son cultivadas como ornamentales por sus grandes flores y muy atractivos colores. Así mismo, este género tiene otros usos: *Ipomoea purpurea* es conocida porque en sus semillas tiene un alcaloide (ergolina) con efectos alucinógenos, y fue muy utilizada por culturas originarias de América central. *Ipomoea jalapa* se encuentra en las regiones de Álamos y Yécora, Sonora, y aunque no está reportado su uso en esta parte del estado, se sabe que en el sur del país la explotan por su valor medicinal como laxante natural; comúnmente es conocida como purga y en dosis altas puede ser tóxica.

A pesar de que existen algunos estudios sobre el género *Ipomoea*, es importante la generación de mayor conocimiento sobre estas plantas, su abundancia y distribución, biología de la polinización, fisiología, etc., ya que ello nos permitirá profundizar en su uso potencial como plantas ornamentales y medicinales.

## Autora

María de los Ángeles Quintana Vásquez, Instituto de Ecología UNAM, Hermosillo, Sonora; quintana@ecologia.unam.mx



Figura 1. Palo blanco o palo santo, *Ipomoea arborescens*.



Figura 2. Flores de *Ipomoea arborescens*.

## El carpintero imperial (*Campephilus imperialis*)

El registro fósil de nuestro planeta muestra que la historia de los seres vivos está marcada por dos patrones generales. Por un lado el registro muestra la aparición, diversificación y persistencia de nuevos grupos, y por otro muestra la extinción de grupos importantes de organismos de la faz de la Tierra. Las extinciones de especies se atribuyen a diversas causas, por ejemplo, el cambio climático inducido por el impacto de meteoritos, glaciaciones, incremento en la actividad volcánica y transgresiones marinas, entre otras. Sin embargo, en tiempos recientes la transformación de los ecosistemas y el impacto de la actividad humana han incrementado considerablemente la extinción de especies.

Se estima que durante los últimos 400 años, se han extinguido cerca de 80 especies de mamíferos, 130 especies de aves, 21 de reptiles, 5 de anfibios, 81 de peces, cerca de 375 especies de invertebrados y 380 especies de plantas, como consecuencia del impacto humano sobre nuestro planeta. Esta tasa de extinción es preocupante ya que es aproximadamente 100 veces más alta que el promedio de extinciones de especies sugerido por el registro fósil. En México se estima que durante los últimos 400 años hemos perdido cerca de 50 especies entre las que destacan 21 especies de plantas, 12 de peces, 8 de aves y 5 de mamíferos. El carpintero imperial (*Campephilus imperialis*) es una de las especies de aves que habitaba en nuestro país hasta la década de los sesentas y que muy probablemente se ha extinguido para siempre. En esta nota se hace un breve resumen de lo poco que sabemos sobre esta ave y de las causas que llevaron a su desaparición, como un ejemplo de la pérdida de la diversidad biológica de nuestro país.

Los pájaros carpinteros pertenecen a la familia Picidae del orden de los Piciformes, de la cual se conocen cerca de 200 especies distribuidas en todo el mundo excepto Oceanía. Los carpinteros se caracterizan por tener picos muy poderosos que les permiten perforar en los troncos de los árboles, y lenguas finas, puntiagudas y con pequeñas cerdas para extraer la comida.

Poseen patas con cuatro dedos con una distribución peculiar: dos apuntando hacia delante y dos hacia atrás. Esta distribución de los dedos es muy útil para adherirse a los troncos y les permite caminar verticalmente a lo largo de los árboles. La mayoría de estas aves anidan en cavidades que ellas mismas construyen en los troncos de árboles.

El carpintero imperial era el más grande de los carpinteros del mundo. Los individuos adultos llegaban a medir entre 51 y 56 cm de largo. Era un ave de color negro con excepción del dorso, donde presentaba dos líneas laterales blancas a lo largo de la base de las alas, y las plumas primarias tenían puntas blancas lo que formaba un parche blanco en las alas (Figura 1). Los machos tenían una cresta roja terminada en punta, mientras que las hembras tenían una cresta negra que se curvaba hacia adelante. El pico era muy largo y de color marfil.

El carpintero imperial era una especie endémica de México. Habitaba a lo largo de la Sierra Madre Occidental desde Sonora hasta Michoacán. Su hábitat eran bosques de pino-encino con abundancia de árboles vivos o muertos en pie, de entre 15 y 20 metros de altura, generalmente a más de 2000 metros de altitud sobre el nivel del mar. Dado que esta especie no pudo ser estudiada en su hábitat natural por ornitólogos profesionales (biólogos que estudian las aves), lo que se sabe de sus hábitos alimenticios proviene de entrevistas con habitantes de la Sierra Madre Occidental. La mayoría de los informantes observaban que este carpintero conseguía su alimento de pinos muertos ya sea en pie o caídos. Estas aves excavaban en los troncos de los árboles y según los informantes se alimentaban de gusanos blancos que quizás fueran larvas de escarabajos. Los habitantes de la sierra describen que sus nidos eran hoyos grandes en pinos altos, generalmente muertos. Recuerdan que en general estas aves vivían en grupos de 7 a 8 individuos. La reproducción aparentemente ocurría durante la primavera ya que las únicas observaciones de huevos y polluelos en nidos se registraron entre los meses de febrero y mayo. Los habitantes de la Sierra Madre Occidental reportan que los últimos carpinteros imperiales fueron observados entre 1946 y 1965.

¿Qué ocasionó la extinción de este impresionante carpintero? Toda la evidencia disponible parece indi-

car que fue la cacería excesiva y la destrucción de su hábitat natural, es decir la tala de los bosques de pino donde vivía. Por increíble que parezca, este carpintero era cazado por su valor alimenticio y por sus propiedades medicinales. La caza de esta ave comenzó hace muchos años ya que se sabe que grupos indígenas como los Tarahumaras usaban las plumas de este carpintero para fines medicinales. También se cazaba como fuente de alimento y para utilizar el pico como herramienta o como pasador del pelo. En tiempos más recientes, la introducción a gran escala del rifle calibre 22 aumentó considerablemente la presión sobre este carpintero. Por otra parte, la tala de los bosques de pino-encino de la Sierra Madre Occidental ha destruido un porcentaje considerable de su hábitat. En particular, la extracción selectiva de los árboles muertos apropiados para la anidación y alimentación del carpintero imperial ha tenido graves consecuencias. En resumen, se cree que la combinación de la cacería excesiva y la tala selectiva de los árboles clave en la anidación y alimentación de este carpintero, contribuyeron significativamente a su extinción.

El 28 de abril de 2005, la revista *Science* publicó un artículo de un grupo de ornitólogos de la Universidad de Cornell, donde se reportaba el redescubrimiento del carpintero real (*Campephilus principalis*) en bosques del estado de Arkansas en los Estados Unidos. Este carpintero, como el carpintero imperial de México, se consideraba extinto y las observaciones reportadas hacían renacer la esperanza de que todavía quedarán individuos en bosques remotos de los Estados Unidos. El reporte desató la búsqueda de este carpintero por la región y, desafortunadamente, después de varios años no se ha registrado evidencia inequívoca de que todavía exista en los Estados Unidos. Algunos ornitólogos creen que se trató de una confusión del carpintero real con otro carpintero común en la región. Sin embargo, existe la posibilidad de que todavía queden individuos de los carpinteros (imperial y real) considerados como extintos, en alguna región remota. Por esta razón, de\* bemos de referirnos a ellos como probablemente extintos; es decir, existe la posibilidad (aunque sea remota) de que algún día alguien descubra que todavía quedan carpinteros imperiales en la Sierra Madre Occidental. Tenemos la esperanza de que algún biólogo(a) mexicano(a) tenga el enorme placer de observarlo y reportarlo al mundo.



Figura 1. Carpintero imperial. Macho (derecha, arriba) y hembra (izquierda). Fotografía reproducida con el permiso del Museo de Wiesbaden, Alemania (MWNH), colección nacional de historia natural.

## Autor

Francisco Molina Freaner, Instituto de Ecología UNAM, Hermosillo, Sonora; freaner@servidor.unam.mx

Contraportada. Arriba: Artículo Litósfera, Figura 9. Monte St. Helens, Washington, Estados Unidos de América. Este volcán es un ejemplo del volcanismo de arco continental alejado decenas de kilómetros de la trinchera, donde se hunde la placa del Pacífico por debajo de la placa Norteamericana. Hizo erupción el 18 de Mayo de 1980 causando una gran destrucción en el medio físico y biológico en un área de 600 km<sup>2</sup>. La pérdida de vidas humanas se redujo solo a 63 personas gracias al continuo monitoreo de los volcanólogos y a la apropiada interpretación de las señales de advertencia del propio volcán (Imagen tomada de la página electrónica de la Administración Nacional Aero-náutica y del Espacio de los Estados Unidos: [http://denaligsfc.nasa.gov/research/volc2/volc\\_top.html](http://denaligsfc.nasa.gov/research/volc2/volc_top.html)). — Abajo, izquierda: Artículo Hidrósfera. Cascada sobre basaltos columnares en San Miguel Regla, Hidalgo. Foto María Erica Ortega Rivera. — Abajo, derecha: Artículo Biósfera. Dragón de mar foliado (*Phycodurus eques*). Pez marino relacionado con el caballito de mar, que vive en las praderas marinas del sur de Australia. Los adultos alcanzan 45 cm de tamaño. Se alimentan de zooplancton. Los apéndices en forma de hoja que presentan en su cabeza y cuerpo, así como su coloración verdosa, les dan apariencia de plantas, sirviéndoles de camuflaje. Fotografía cortesía de Todd Stailey, Tennessee Aquarium.