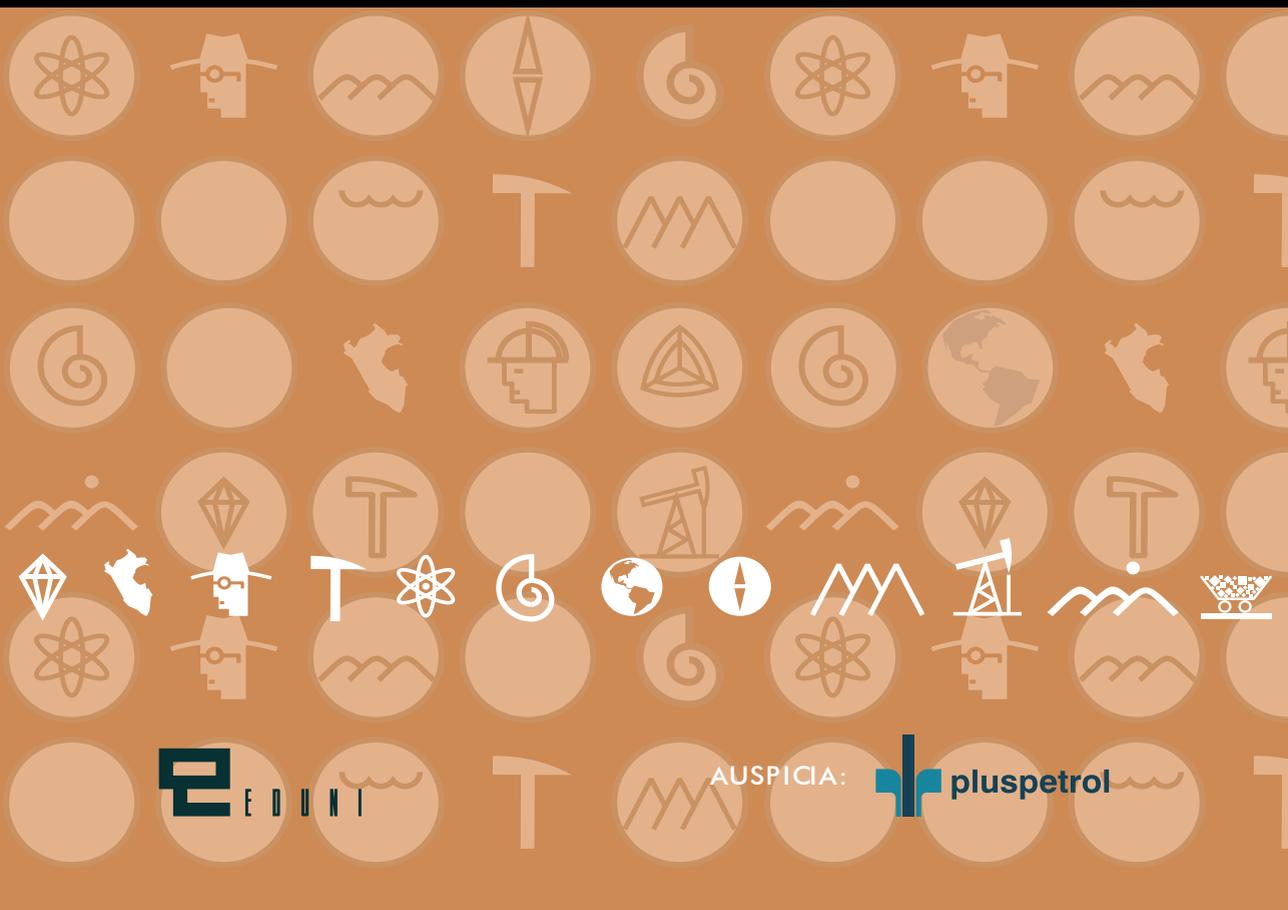




Universidad Nacional de Ingeniería  
Programa Editorial Eduardo de Habich  
Textos UNI

# Compendio de Geología General

David R. Rojas Caballero  
Jorge Paredes Ángeles



AUSPICIA:





David R. Rojas Caballero / Jorge Paredes Ángeles

# Compendio de Geología general



UNI

Editorial Universitaria

Rector **Mag. Ing. Aurelio Padilla Ríos**  
Primer Vicerrector **Geol. José S. Martínez Talledo**  
Segundo Vicerrector **Arq. Luis Cabello Ortega**  
(Presidente de la Comisión del Concurso)

Primera edición, noviembre de 2008

**COMPENDIO DE GEOLOGÍA GENERAL**

Impreso en el Perú / Printed in Peru

© **David R. Rojas Caballero / Jorge Paredes Ángeles**  
Derechos reservados

Universidad Nacional de Ingeniería  
Editorial Universitaria



Av. Túpac Amaru 210, Rímac - Lima  
Pabellón Central / Sótano  
Teléfonos 4814196 / 481-1070 anexo 215  
Correo-e: [eduni@uni.edu.pe](mailto:eduni@uni.edu.pe)

Jefe EDUNI: Prof. Álvaro Montaña Freire  
Coordinador Editorial: Nilton Zelada Minaya  
Diseño de portada: Arq. Manuel Flores Caballero  
Corrección y Diagramación: EDUNI

Impreso por Tarea Asociación Gráfica Educativa

Jr. ...

Telf. .... e-mail: ....

ISBN: 978-603-45153-3-8

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional  
del Perú N° 2008-08251

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio,  
total o parcialmente, sin permiso expreso del autor.

Esta publicación fue posible gracias al auspicio de



Me es grato presentar a la comunidad académica de la Universidad Nacional de Ingeniería y del país en general esta colección de libros de texto, publicada en el marco del Programa Editorial Eduardo de Habich emprendido por nuestra Editorial Universitaria – EDUNI.

La Universidad convocó un concurso que fue realizado internamente en cada Facultad para seleccionar los libros que componen esta colección. De esta manera estamos premiando el esfuerzo perseverante de nuestros docentes, que perfeccionan una y otra vez sus métodos pedagógicos en la experiencia del dictado cotidiano de clases.

Es propósito de este Rectorado continuar alentando la producción bibliográfica de nuestros docentes y egresados, que, a no dudarlo, cubre una necesidad académica y profesional.

Mag. Ing. Aurelio Padilla Ríos  
Rector UNI



# Índice

<b>Introducción</b>	9
<b>Capítulo 1. Tópicos generales</b>	11
Relación de la geología con otras ciencias	12
División de las ciencias geológicas	12
Importancia de la geología en la ingeniería	15
El ciclo geológico	16
El universo	18
El Sistema Solar	20
La Tierra como planeta	25
<b>Capítulo 2. Magmatismo</b>	47
El magma	47
Fundición de una roca en la naturaleza	49
Calor terrestre	56
Magmatismo intrusivo	57
Magmatismo extrusivo	60
Vulcanismo	60
Rocas efusivas	76
<b>Capítulo 3. Meteorización o intemperismo</b>	79
Velocidad de meteorización	81
Procesos físicos	82
Procesos químicos	84
Meteorización de rocas representativas	89
Suelos	90

<b>Capítulo 4. Metamorfismo y rocas metamórficas</b>	97
Conceptos básicos	99
Principales cambios	100
Factores de metamorfismo (agentes)	101
Tipos de metamorfismo	102
Zonas metamórficas	106
Facies metamórficas	107
Rocas metamórficas	107
Aplicaciones y localización en el Perú	108
Mecánica de la deformación	108
<b>Capítulo 5. Deformación de la corteza terrestre</b>	109
Plegamientos	115
Fracturas	117
Discordancias o disconformidades	121
Planos geológicos	123
<b>Capítulo 6. Formación de montañas y evolución continental</b>	127
Calor y energía mecánica	130
Modelos de formación de montañas	130
Origen y evolución de los continentes	144
Geofísica	145
Sismología	145
<b>Capítulo 7. Movimientos sísmicos</b>	145
El sismógrafo	158
Sismología a partir de la Tectónica de Placas	162
Zona de Benioff	163
Tipos de subducción	163
Sinopsis histórica	164
<b>Capítulo 8. Tiempo geológico y significado de los fósiles</b>	165
Las rocas sedimentarias en el tiempo	179
Escala del tiempo geológico	175
<b>Capítulo 9. Movimiento del terreno superficial</b>	183
Definición y generalidades	183
Movimiento de masa	183
Ciencias y ramas de la geología que estudian el agua	191

<b>Capítulo 10. Acción geológica de las aguas superficiales</b>	193
El ciclo hidrológico	192
Factores en el desplazamiento de las aguas superficiales	193
Evolución de las aguas de lluvia	193
Torrentes y ríos	194
Trabajo geológico de las aguas superficiales	199
Los valles	202
Depósitos fluviales	212
<b>Capítulo 11. Aguas subterráneas</b>	217
Clases de aguas subterráneas	216
Trabajo geológico de las aguas subterráneas	226
Acuífero y acuífugo	226
Manantiales o fuentes	233
Características hidrológicas del Perú	235
Proceso cárstico	236
<b>Capítulo 12. Acción geológica del mar</b>	241
Composición de las aguas marinas	243
Ciencias que estudian los mares	243
Movimientos de las aguas marinas: las olas	244
Corrientes marinas	250
Modelado costero: erosión y deposición marina	251
Arrecifes coralinos	256
Morfología submarina	260
Depósitos de sal	262
El viento como agente meteorológico	265
<b>Capítulo 13. Acción geológica del viento</b>	267
Erosión eólica	266
Deposición eólica	270
<b>Capítulo 14. Glaciación</b>	285
Edad de las glaciaciones	285
Glaciar	286
Trabajo geológico de los glaciares	290
Depósitos no estratificados	292
Morfología glaciar	293

<b>Capítulo 15. Recursos naturales</b>	295
Generalidades	295
Yacimiento	295
El petróleo	300
El carbón	304
Minerales radiactivos	305
<b>Glosario</b>	309
<b>Bibliografía</b>	315

# Introducción

Como toda ciencia, la Geología evoluciona constantemente, se replantea conceptos y adopta nuevos paradigmas. Por ejemplo, el desarrollo y consolidación de la Teoría de la Tectónica de Placas ha significado un enorme progreso de las Ciencias de la Tierra porque ha permitido responder muchas interrogantes planteadas por los investigadores a lo largo de varios siglos, aunque también ha abierto nuevas interrogantes.

La Geología es, además, una ciencia que va adquiriendo mayor importancia en la aplicación de soluciones a problemas relativos al uso de los suelos, preservación del medio ambiente y ecología, utilización racional y conservación de recursos naturales, prevención y defensa de desastres por fenómenos naturales, como deslizamientos, inundaciones, erupciones volcánicas, seísmos y terremotos. Asimismo, ha desarrollado con éxito herramientas de búsqueda y prospección de depósitos de minerales, petróleo y gas, mediante la aplicación de conocimientos de otras disciplinas y metodologías de investigación.

La Geología es, por lo tanto, una disciplina con dinámica propia, y su explicación sistemática se pretende realizar en este *Compendio de geología general*, información recopilada, organizada y revisada por David Rojas Caballero y Jorge Paredes Ángeles a lo largo de varios años como resultado de la experiencia de ambos en la actividad profesional y en la docencia universitaria. Ahora presentan este libro con el objetivo de ayudar a los estudiantes a consolidar una base sólida de conocimientos que los haga capaces de analizar y comprender la naturaleza de los sucesos geológicos más importantes.

En ese sentido, es necesario agregar que el curso de Geología general es fundamental en la formación académica de los futuros profesionales de Ciencias de la Tierra, pues les permitirá conocer la estructura y composición de nuestro planeta, la corteza terrestre, los procesos exógenos y endógenos que ocurren; además de enseñarles sobre los recursos minerales que necesita la industria actualmente.

Es necesario precisar que el desarrollo del curso y la edición del libro partieron del supuesto de que los lectores cuentan con la suficiente base de conocimientos en física y química, por lo que no se profundiza en ciertos tópicos de estas ciencias, algo que, de hacerse, ciertamente consumiría más tiempo y recursos. El compendio tampoco detalla aspectos poco importantes para el lector, pues su propósito es explicar la Geología en un lenguaje ágil, sencillo, claro; que evita en lo posible tecnicismos y terminología de iniciados.

David Rojas se encargó de la redacción de los capítulos del 1 al 5 y del 7 al 15; Jorge Paredes introdujo modificaciones en ellos y preparó el capítulo 6. Luego ambos revisaron y corrigieron el compendio completo. La versión final está ahora en manos del lector.

Los autores quedan muy agradecidos a Ángel Choque, Gúmer Fernández, Mariabel Villanueva y Diana Espino, quienes apoyaron, básicamente, en la recopilación de material gráfico.

Finalmente, conscientes de que como toda obra este libro de texto es perfectible, se pide a los lectores que hagan llegar sus críticas, sugerencias y opiniones a estas direcciones electrónicas: rojasdr@uni.edu.pe y jhparedes@gmail.com, las mismas que siempre serán bien recibidas y servirán para que el *Compendio de geología general* sea un buen material de referencia y consulta en temas de Geología.

Lima, octubre de 2008.

# Capítulo 1

## Tópicos generales

La palabra geología proviene de los vocablos griegos *geo*, que significa tierra, y *logos*, tratado. Quiere decir que por etimología la Geología es el tratado de la Tierra. Meléndez y Fuster definen la Geología como “la ciencia que estudia la Tierra, su composición, su estructura y los fenómenos de toda índole que en ella tienen lugar incluyendo su pasado, mediante los documentos que de ellos han quedado en las rocas”<sup>1</sup>. Para Dercourt-Paquet la Geología analiza el ambiente físico del hombre con la finalidad de extraer leyes. Se enfrenta con objetos de talla infinitamente variables. No se limita al análisis de la Tierra en su forma actual sino que intenta reconstruir su pasado, investigando los fenómenos antiguos que quedaron plasmados y fosilizados.

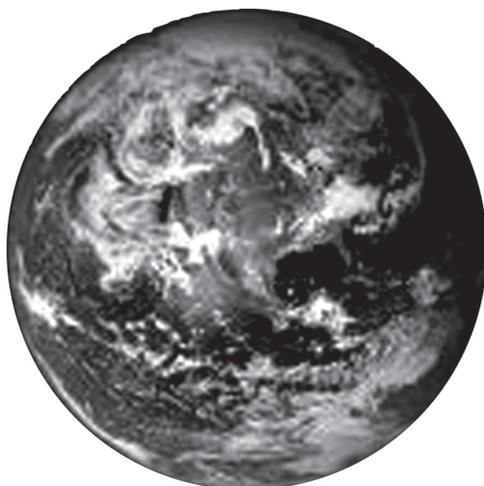


Fig. 1 La Tierra vista desde el cosmos.

<sup>1</sup> Meléndez B. y J. M. Fuster. (1991). *Geología*. Madrid, Editorial Paraninfo.

En conclusión, la Geología es la Ciencia de la Tierra que estudia el origen, composición, estructura y los fenómenos que se han producido en ella desde su génesis hasta la actualidad. Una definición científica diría que es la combinación matemática, física, química y biológica del estudio de la Tierra tal como hoy existe, y los procesos y estados a través de los cuales ha evolucionado.

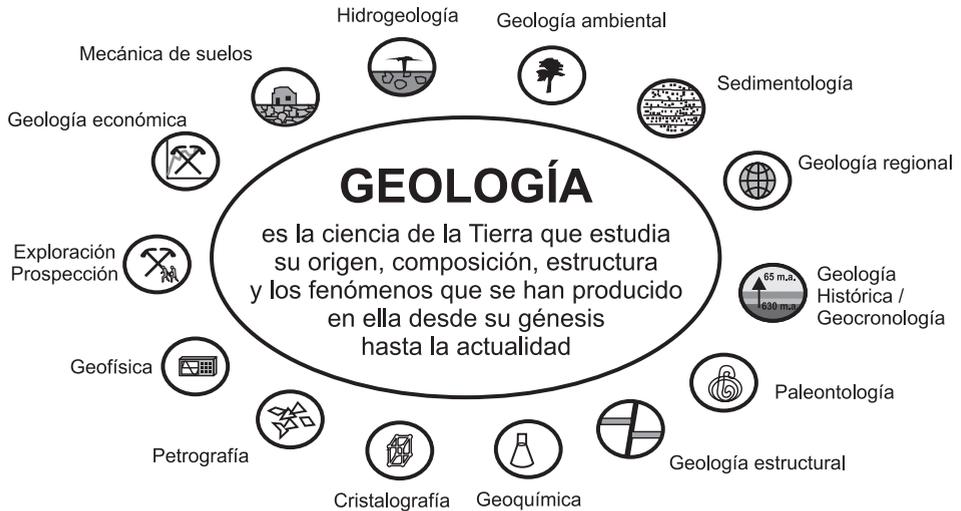


Fig. 2. La geología y sus ramas.

## Relación de la geología con otras ciencias

La Geología es una ciencia independiente y relativamente joven que necesita los métodos de investigación, principios y leyes de otras ciencias como la química, física, biología y astronomía. Para el científico moderno, la mayoría de fenómenos geológicos pueden ser tratados con el apoyo de la física, química y biología.

## División de las ciencias geológicas

Como toda ciencia, la Geología es compleja, y para fines de estudio se le ha subdividido en varios campos de especialización:

- **Geoquímica:** Estudia la Tierra como un sistema químico; analiza las rocas desde el punto de vista de su composición química; trata de la distribución y migración de los elementos químicos en la corteza terrestre y en el interior del globo terráqueo en función de sus afinidades mutuas y de su misma estructura atómica.

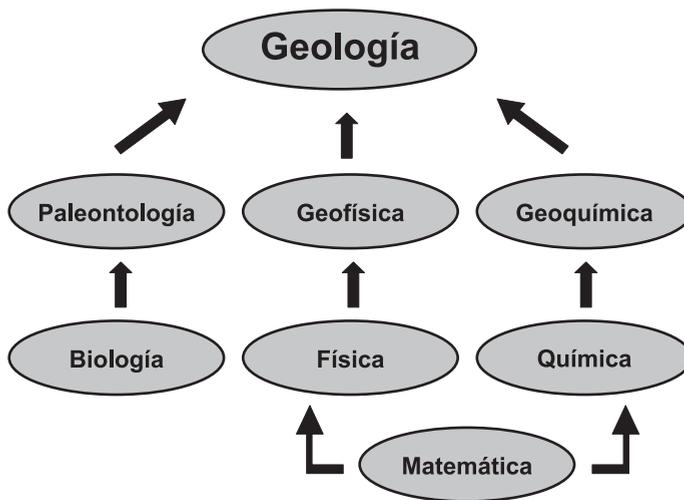


Fig. 3. La geología y las ciencias básicas.

- **Geofísica:** Estudia la Tierra investigando sus propiedades físicas en general, las variaciones de gravedad en la superficie terrestre y la propagación de las ondas sonoras a través de las rocas.
- **Paleontología:** Estudia los animales y las plantas que vivieron en la Tierra durante la prehistoria y que han dado lugar, por evolución gradual, a las formas de vida que encontramos actualmente. No solamente describe los fósiles sino que también trata de interpretar las condiciones en que se desarrollaron.
- **Mineralogía:** Es la ciencia de los minerales, que estudia su composición, estructura, propiedades físicas, y el origen y las condiciones de un yacimiento.
- **Cristalografía:** Es el tratado de los cristales, que estudia principalmente la forma exterior y estructura interna de los minerales cristalizados.
- **Petrología:** Estudia la composición química y mineralógica de las rocas, su distribución, propiedades y origen.
- **Estratigrafía:** Es el estudio de las rocas sedimentarias que se depositaron en forma de capas o “estratos” y su correlación con otras.
- **Geomorfología:** Estudia el relieve de la superficie terrestre y los fenómenos que han dado lugar a la actual configuración de la misma.

- **Geología estructural:** Estudia los mecanismos y los resultados de la rotura y deformación de la corteza terrestre. Su objetivo es determinar los fenómenos que originaron esa deformación, por ejemplo: fallas, pliegues y diaclasas.
- **Geología histórica:** Estudia la historia de la tierra, es decir su evolución en el transcurso del tiempo, la distribución de los mares y tierras en periodos geológicos pasados.
- **Hidrogeología:** Se ocupa principalmente del estudio de las aguas continentales, en especial de las aguas subterráneas.
- **Limnología:** Se dedica al estudio geológico de pantanos y lagos.
- **Geología marina:** Estudia la acción de los océanos, sus cuencas, yacimientos y corrientes.
- **Geotecnia:** Es la aplicación de la Geología en la construcción de obras de ingeniería.
- **Sedimentología:** Estudia los sedimentos (gravas, arenas, arcillas, etc.) con la finalidad de determinar su origen, propiedades y efectos.
- **Geología económica:** Su objetivo es la evaluación de la economía de un yacimiento o producto mineralizado, así como la exploración de yacimientos metálicos o no-metálicos.
- **Exploración y prospección:** Es la búsqueda de yacimientos geológicos con valor económico, por medio de la geofísica, la geoquímica, el mapeo, las fotos aéreas y las imágenes satelitales.
- **Geología ambiental:** Se ocupa de hallar sectores contaminados, formas y procesos de contaminación, especialmente de agua, agua subterránea y suelos. Investiga la calidad de agua y suelo.

Existen otras geociencias, muchas de las cuales tienen nombres que no necesitan mayor explicación para comprender su objeto de estudio, como ejemplos podemos mencionar: la glaciología, la sismología, la fotogeología (imágenes de sensores remotos) o la geología del petróleo.

Por otro lado, en la actualidad los estudios geológicos contribuyen a resolver problemas en geoestadística, mecánica de rocas y mecánica de suelos.

## Importancia de la Geología en la ingeniería

Todas las obras de ingeniería afectan la superficie de la Tierra, puesto que se asientan o se abren en cualquier parte de la corteza terrestre. La ingeniería proyecta esas obras, dirige e inspecciona su ejecución.

Es tan evidente e íntima la relación que existe entre la Ingeniería y la Geología, que parecería innecesario mencionarla. Pero por desgracia durante mucho tiempo se han realizado obras de ingeniería en todos los países prescindiendo de la Geología y de los geólogos.

Sin embargo, hoy la Geología forma parte de la práctica moderna de la ingeniería. Es materia de estudio para todos los ingenieros, cuyos informes contienen frecuentes referencias a los rasgos geológicos de los lugares donde trabajan. Y cada día se hace mayor uso de los conocimientos geológicos en las siguientes ramas de la ingeniería:

- **Ingeniería minera y metalúrgica:** principalmente en la ubicación de recursos minerales y en la obtención de metales con el máximo grado de pureza.
- **Ingeniería del petróleo:** en la ubicación de yacimientos de hidrocarburos.
- **Ingeniería civil-geotecnia:** en la construcción de diversas obras como presas, túneles, carreteras, puentes o edificaciones.
- **Ingeniería química-industrial:** en el estudio de la composición de minerales y usos como materia prima en la industria.
- **Ingeniería agraria:** en el estudio de la composición de los suelos y las irrigaciones.
- **Ingeniería ambiental:** en el estudio del ambiente y de las aguas subterráneas.
- **Ingeniería militar:** en el estudio de las condiciones óptimas del terreno.
- **Ingeniería marina:** en el estudio y características del litoral y del mar.
- **Ingeniería espacial:** en el estudio del origen del universo.
- **Arquitectura:** en el estudio de las rocas ornamentales.
- **Planificaciones:** en la ubicación de ciudades y pueblos en formación.

## El ciclo geológico

Como resultado de la acción combinada de dos fuerzas antagónicas que actúan sobre la corteza terrestre, una de origen externo y otra de origen interno, la Tierra se encuentra en un proceso de transformación continua que se inició hace varios miles de millones de años y que no tiene final predecible. Estas fuerzas tienden a destruir el relieve continental y a crear nuevos materiales que luego formarán las montañas.

### Ciclo geodinámico externo

Comprende la destrucción o erosión de las rocas superficiales, el transporte y la sedimentación de los materiales resultantes en el fondo del mar. Son fuerzas que actúan desde el exterior sobre la superficie terrestre, esencialmente por cambios de temperatura debido a la radiación solar, y se manifiestan en los procesos de erosión, transporte y deposición de materiales mediante la lluvia, los torrentes, los ríos, los glaciares y el mar. Estos procesos tienden a destruir las irregularidades de la superficie de los continentes, originadas por las acciones de la dinámica interna, y a restablecer el equilibrio en la litosfera.

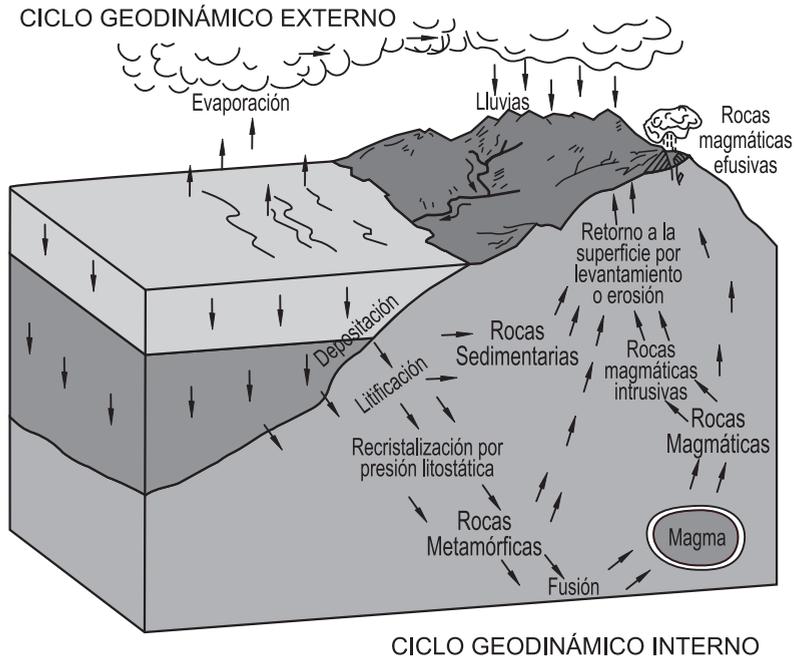


Fig. 4. El ciclo geológico.

## Ciclo geodinámico interno

Comprende los procesos de diastrofismo (del griego *diastrophe*: distorsión), que es el resultado de los movimientos epirogénicos y orogénicos que causan las transformaciones de la corteza terrestre. Se originan nuevas rocas magmáticas, los fenómenos volcánicos y los procesos orogénicos que forman nuevas montañas.

Las fuerzas internas tienen su origen en cierta fuente de energía propia de la Tierra que, al menos parcialmente, es un residuo de la energía acumulada durante su fase estelar, antes de constituirse en un planeta individual, y de la energía desprendida en los procesos de radiactividad, que tiene lugar en la litosfera.

La geodinámica interna del globo terráqueo tiende a transformar la corteza terrestre levantándola o hundiéndola, provocando reajustes físico-químicos y mecánicos entre sus componentes. Su efecto más sensible es la formación de montañas y sus manifestaciones más espectaculares son los volcanes y los sismos.

Cuando las rocas formadas por sedimentación alcanzan zonas profundas de la corteza terrestre sufren ciertas transformaciones y son desplazadas de nuevo hacia la superficie mediante presiones radiales o tangenciales que originan la formación de montañas y la emisión de rocas fundidas a elevadas temperaturas por los volcanes.

De esta manera se establece un ciclo de fenómenos geológicos en el que alternan los procesos de destrucción y reconstrucción de los materiales de la corteza terrestre. Sin embargo, como ninguna de las dos fuerzas antagónicas en acción tienden a disminuir, nunca se llega a un equilibrio estable definitivo.

## Actualismo geológico

La interpretación de los fenómenos geológicos está basada en un postulado atribuido al geólogo escocés James Hutton en 1795, que fue enunciado formalmente mucho tiempo después por Charles Lyell, quien desarrolla en el siglo XIX la Teoría de la Uniformidad, según la cual todos los procesos naturales que cambian la Tierra en el presente lo han hecho de forma idéntica en el pasado. Esta teoría ha sido bautizada con el nombre técnico de Actualismo, cuyo lema central es “el presente es la clave del pasado”.

## El universo

Se sabe que el espacio es ilimitado en todos sus sentidos. Cuando por las noches se observa el espacio se percibe incontables puntos de luz. La mayoría de estos resplandores son estrellas que permanecen en la misma posición relativa y aparente unas respecto de las otras. Entre ellas tenemos unas que son errantes constantemente y son llamadas planetas.

Con la ayuda de un telescopio se puede observar manchones de luz que vienen a ser las nebulosas. Nuestra nebulosa o galaxia ha sido denominada Vía Láctea y tiene estrellas que se agrupan para formar constelaciones, las cuales por su ubicación con respecto a nuestro planeta se denominan australes (hemisferio sur), boreales (hemisferio norte) y zodiacales (zona ecuatorial).

En resumen, el Universo está constituido por sistemas de galaxias, las cuales agrupan a un conjunto de nebulosas y galaxias, y éstas a su vez están conformadas por un conglomerado de estrellas, polvo y gas. Nuestra galaxia, a la que conocemos como Vía Láctea o Camino de Santiago está constituida por millones de estrellas, el Sistema Solar, polvo, gas interestelar y agujeros negros.

## La Paradoja de Olbers

La Paradoja de Olbers, planteada en la década de 1820 por el físico y astrónomo alemán Wilhelm Olbers, prueba que el Universo tiene que ser finito. Sus principales razonamientos son los siguientes:

1. Universo infinito = cantidad de estrellas infinitas
2. Cantidad estrellas infinitas = cantidad de luz infinita
3. Cantidad de luz infinita = espacio (universo) luminoso
4. Pero el universo no es luminoso, la noche es oscura, por eso el universo no puede ser infinito, tiene que ser finito.

Por otro lado, un universo “curvado” de tres dimensiones es finito, pero para el ser humano ilimitado. Imagínese un ser vivo que solo conoce una dimensión, es decir conoce solo hacia atrás y adelante. Un hilo sería su mundo, un mundo finito y limitado. Finito significa que su mundo tiene un espacio calculable; limitado que su mundo tiene límites. Para mejorar su vida solo tenemos que juntar los extremos del hilo y entonces el ser vivo tiene un mundo ilimitado, aunque todavía su mundo es finito, es decir, tiene un espacio calculable.

Lo mismo se puede hacer con dos dimensiones. Un animal que solo conoce dos dimensiones (adelante-atrás y derecha-izquierda), es decir, un plano horizontal (papel), tendría un mundo finito y limitado. Una esfera corresponde al mundo finito pero ilimitado. Este animal no conoce arriba y abajo, por eso no entiende la forma esférica. En tres dimensiones nosotros somos el animal. Para nosotros existen tres dimensiones. Entendemos nuestro mundo con tres dimensiones en la forma finita y limitada. La forma correcta (verdadera) de ser finito e ilimitado es para nosotros inexplicable.

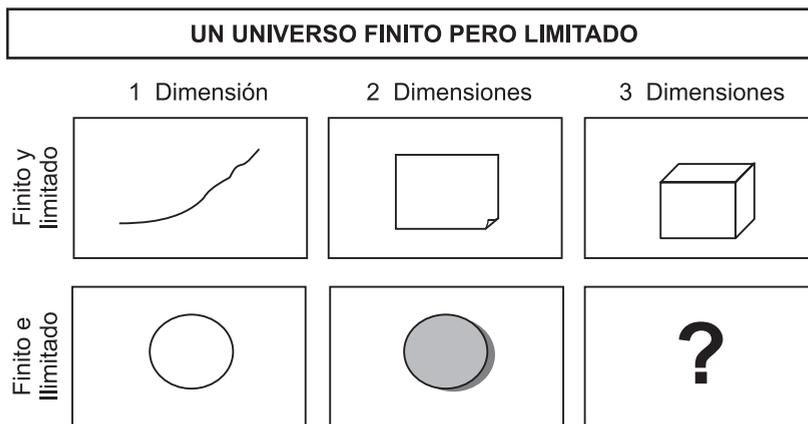


Fig. 5. Un Universo finito e ilimitado. La Paradoja de Olbers.

## Expansión y composición del universo

- La Teoría del Big Bang (Gran Explosión) explica la expansión del universo, producida hace aproximadamente 14 mil millones de años.
- Desplazamiento de luz hacia el rojo (Efecto Doppler): las líneas espectrales de algunas estrellas llegan a la tierra con una frecuencia más hacia el rojo que lo normal.

Al comparar la composición química del universo, la Tierra y el ser vivo, se comprueba que el Universo y los seres vivos tienen elementos constitutivos similares, solo que en rangos diferentes. Los cuatro elementos más importantes en ambos son: hidrógeno (H), oxígeno (O), carbono (C) y nitrógeno (N). En cambio, la Tierra tiene una composición totalmente diferente, en donde el hierro (Fe), el oxígeno (O), el silicio (Si) y el magnesio (Mg) presentan mayor abundancia.

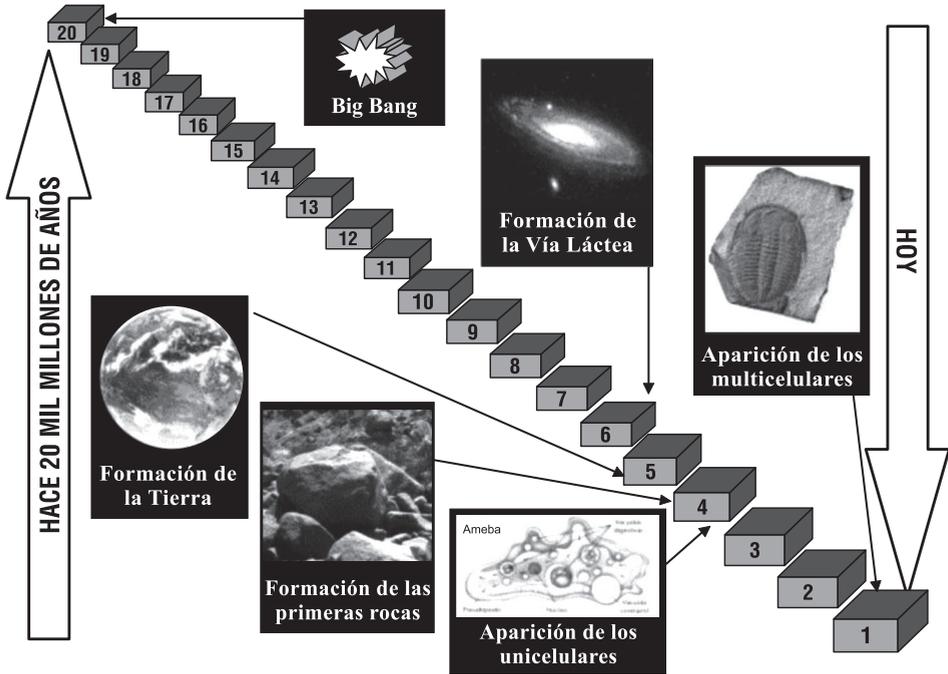


Fig. 6. Evolución del Universo.

### Composición química del Universo, la Tierra y los seres vivos

	Elementos			
Universo	Hidrógeno	Oxígeno	Carbono	Nitrógeno
Tierra	Hierro	Oxígeno	Silicio	Magnesio
Organismos	Carbono	Oxígeno	Hidrógeno	Nitrógeno

### El Sistema Solar

El Sol es una estrella luminosa compuesta de gas. Es fuente de luz, calor y vida. Está situado a  $150 \times 10^6$  km de la Tierra, aproximadamente y tiene un diámetro de  $1\,392 \times 10^6$  km. Posee una masa 332 mil veces mayor a la de la Tierra y una densidad de  $1,4 \text{ g/cm}^3$ . El astro rey tiene energía para  $30\,000 \times 10^6$  años.

El Sistema Solar está constituido por el Sol, ocho planetas, varios planetas enanos, 42 satélites, millones de asteroides y una veintena de cometas (entre ellos el Halley, que apareció en 1910 y en 1986 y se le espera para el 2062) y numerosos meteoritos. Los planetas se clasifican en:

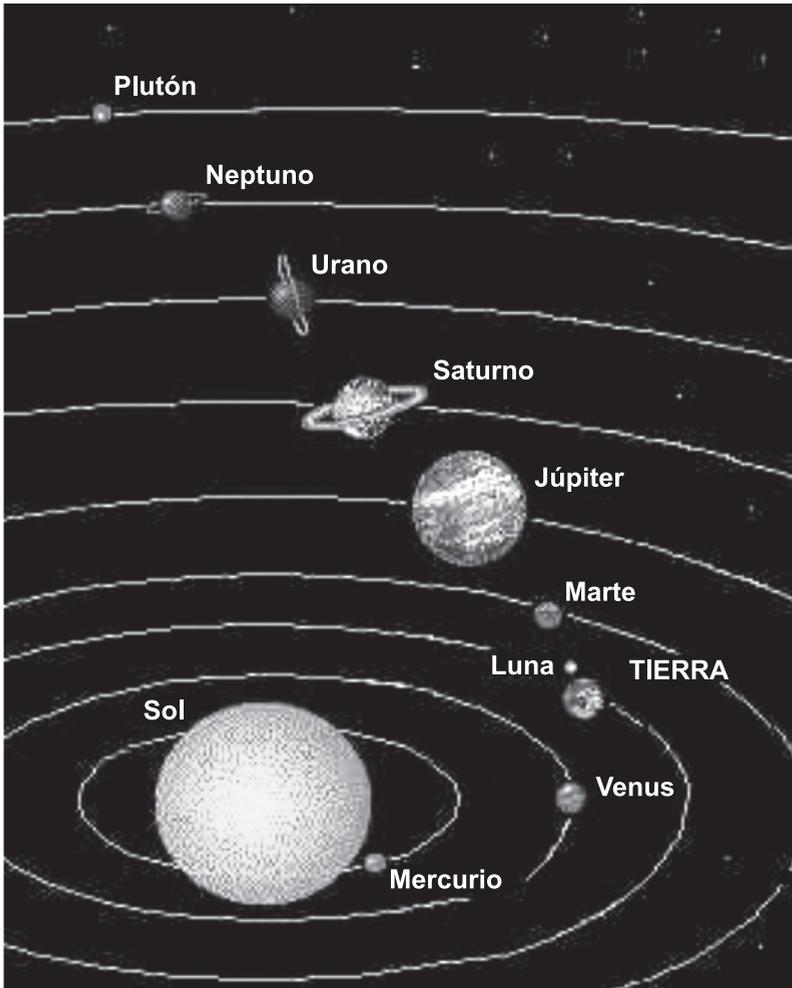


Fig. 7. El Sistema Solar.

**Planetas menores o terrestres:** son densos y de poco volumen, casi no poseen satélites y sus elementos constitutivos predominantes son el silicio, el oxígeno, el hierro y el magnesio, además de silicatos y metales. Pertenecen a este grupo: Mercurio, Venus, Tierra y Marte.

**Planetas mayores o jovianos:** son ligeros y de gran volumen. Están constituidos por hidrógeno, helio, metano, amoníaco, entre otros elementos. Tienen varios satélites. En este grupo se encuentran: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

**Planetas enanos:** Ceres, Plutón y Charonte, así como UB313.

El Sol es el centro de nuestro sistema y todos los planetas giran alrededor de él en dirección de occidente a oriente. Las órbitas de los planetas se encuentran dentro de tres o cuatro grados con respecto a la eclíptica, excepto la de Mercurio que se halla en siete grados. Todos los planetas giran sobre sus respectivos ejes en sentido contrario a las manecillas del reloj, con excepción de Urano.

### Principales características de los planetas

Nombre	Distancia media del Sol (mill. de km)	Diámetro (km)	Incli. de eje de rotación	Núm. de satélites	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Atmósfera
El Sol	0	1 392 000		-	1,41	¿?
Mercurio	58	4 835	28°	-	5,69	No tiene
Venus	107	12 194	3°	-	5,16	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )
Tierra	149	12 756	23°27'	1	5,52	Nitrógeno (N <sub>2</sub> ), oxígeno (O <sub>2</sub> )
Luna	-	3 476		-	3,34	No tiene
Marte	226	6 760	23°59'	2	3,89	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), nitrógeno (N <sub>2</sub> ), argón (Ar)
Júpiter	775	141 600	3°05'	13	1,25	Hidrógeno (H <sub>2</sub> ), helio (He)
Saturno	1421	120 800	26°44'	11	0,62	Hidrógeno (H <sub>2</sub> ), helio (He)
Urano	2861	47 100	82°05'	5	1,60	Hidrógeno (H <sub>2</sub> ), helio (He), metano (CH <sub>4</sub> )
Neptuno	4485	44 600	28°48'	2	2,21	Hidrógeno (H <sub>2</sub> ), helio (He), metano (CH <sub>4</sub> )

### Teorías sobre el origen del Sistema Solar

La mayoría de las teorías acerca del origen de los planetas sostienen que éstos se formaron con materiales procedentes del Sol. También afirman que por condensación de una nube primitiva de polvo y gas existente en nuestra galaxia se formaron el Sol y los planetas, aunque la composición del Sol es muy distinta a la de los planetas. Básicamente, se puede distinguir dos tipos de teorías:

- a) **Teorías naturales o evolutivas.** Según las cuales los sistemas planetarios se consideran parte de la historia evolutiva de algunas estrellas. Si estas teorías son ciertas, existen numerosas estrellas con sistema planetario.
- b) **Teorías catastróficas.** Sostienen que los sistemas planetarios se han formado por accidente, ya sea por el acercamiento o la colisión de dos estrellas.

También es preciso describir otras teorías o hipótesis que se plantearon desde el siglo XVIII (véase al respecto la *Introducción a la Geofísica* de Howell). Asimismo, es necesario conocer los principales criterios considerados en una teoría sobre el origen del Sistema Solar:

- El Sol representa el 99,8% de la masa total del Sistema Solar y los planetas poseen apenas el 0,1% de esa masa.
- Los planetas giran en el mismo sentido —excepto Venus y Urano— y prácticamente en un mismo plano.
- La rotación de los planetas sobre su eje se produce en la misma dirección que su movimiento de traslación (salvo Urano).
- Los planetas están situados a distancias determinadas y forman dos grupos básicos: los terrestres y los jovianos.
- Más del 90% de la materia del Universo está formada por hidrógeno y helio.
- En la Tierra existe un gran déficit de hidrógeno y de los gases inertes, con respecto al Sol y a las estrellas visibles.

**Teoría de la fragmentación.** Propuesta por el naturalista francés George Louis Leclerc conde de Buffon en 1748. Plantea que los planetas se formaron como consecuencia de la colisión de una gran masa con el Sol, que dio como resultado la formación de burbujas de materia que fueron arrojadas al espacio y que llegaron a constituir posteriormente los planetas.

**Teoría de las partículas.** Formulada por Kant en 1755, sostiene que las partes del Sistema Solar son el resultado de la condensación de una nube giratoria, difusa de polvo y gas.

**Teoría de las nebulosas.** Laplace, en 1796, partió de la hipótesis de que en un periodo remoto una nebulosa de polvo y gas en contracción, de diámetro de 150 millones años luz (que actualmente equivale a la distancia del Sol a Plutón), giraba lentamente en el espacio, a medida que se enfriaba y se comprimía aumentó su velocidad rotacional, de tal manera que la fuerza centrífuga superó a la fuerza gravitacional y provocó la separación de un anillo de la región ecuatorial del cuerpo original. Esta nebulosa fue encogiéndose hasta que diez anillos se separaron, nueve de ellos se condensaron para formar los planetas y uno se rompió en masas pequeñas y formó los planetoides. Posteriormente, la masa central de la nebulosa se condensó para dar origen al Sol. Esta teoría es, matemáticamente,

insostenible, pues no explica la distribución del momento angular en el Sistema Solar. Los planetas poseen alrededor del 98% del total del momento angular y el Sol solamente el dos por ciento.

**Teoría de Darwin.** En 1850 Charles Darwin sostuvo que una nube original de meteoritos de distintos tamaños chocaban continuamente y que al hacerlo su atracción gravitatoria tendía a mantenerlos unidos. Como las partículas mayores poseían una atracción gravitatoria mayor que las pequeñas, pronto unos pocos centros de condensación dejaron atrás a los otros, así se formaron el Sol y los planetas.

**Hipótesis planetesimal.** Hecha por T. C. Chamberlain y F. R. Moulton en 1900, sugiere que los planetas del Sistema Solar se formaron por agregación de fragmentos minúsculos de polvo al que denominaron “planetesimales”, derivados a su vez de la disrupción de dos estrellas al aproximarse entre sí. Una de las dos estrellas fue el Sol primitivo, sobre el cual se levantaron mareas por la proximidad de la otra estrella. La materia fue arrancada del flujo de las mareas para que posteriormente se formaran los planetas y otros cuerpos celestes.

**Teoría de la disrupción de mareas.** Propuesta por J. S. Jeans y H. Jeffreys en 1914, quienes modificaron la teoría anterior al sustituir la aproximación por una colisión de rozamiento entre las dos estrellas. Como resultado de este leve contacto se desprendería del Sol un filamento de materia gaseosa y elevada temperatura. El efecto gravitatorio de la otra estrella le comunicaría un movimiento de rotación alrededor de su progenitor. El filamento gaseoso se enfriaría rápidamente y se reuniría en una especie de nudos que eventualmente formarían los planetas.

**Teoría del polvo cósmico.** Planteada por Von Weizacker en 1944, quien afirmaba que el primitivo Sol era como una masa en rápida rotación, rodeada por una extensa envoltura lenticular compuesta de partículas sólidas y de gas en movimiento turbillónar. Dentro de esta envoltura lenticular se produjeron acumulaciones de materia que posteriormente constituyeron los planetas.

**Hipótesis de la colisión.** R. A. Lytleton sugirió que la colisión que dio origen al Sistema Solar se produjo entre una estrella doble (el Sol primitivo y una compañera que giraba a su alrededor) y una tercera estrella.

**Teoría de la Supernova.** Hoyle realizó en 1944 una modificación adicional al suponer que la estrella compañera hizo explosión y se transformó en una nova; los fragmentos que resultaron de la explosión se perdieron para el sistema,

excepto un filamento gaseoso incandescente que se condensó para formar los planetas. Hoyle consideró también que por las elevadas temperaturas implicadas en este proceso, los elementos de bajo peso atómico pasarían por transmutación a otros de peso atómico más elevado, tales como el magnesio, aluminio, silicio, hierro y plomo. De este modo suministrarían una materia necesaria para la formación de la tierra y los otros planetas.

**Teoría del crecimiento y la turbulencia.** Propuesta por H. C. Urey en 1952. Enfoca el problema de un modo diferente: el desarrollo de las estrellas parte de una nube en contracción de gas y polvo interestelar. Una de estas estrellas fue el Sol. Los gases y el polvo residual formaron un disco alrededor del Sol primitivo en el plano de la eclíptica actual. El disco, que era inestable, se rompió en masas enormes que aumentaban de tamaño al incrementar su distancia con respecto al Sol. El crecimiento ulterior de estos cuerpos planetarios se produjo por acumulación —a baja temperatura— de planetesimales de tamaños grandes y pequeños. Según Urey, la tierra y los demás planetas se formaron a temperaturas mucho más bajas de lo que generalmente se ha pensado. Los meteoritos pueden ser los residuos de planetesimales que no consiguieron acumularse hasta constituir planetas.

**Teoría del Big Bang.** Postulada por G. Gamow, sostiene que una explosión de intensidad inimaginable esparció toda la energía y materia en el Universo, a partir de un volumen muy pequeño en la inmensidad del espacio (14 mil millones de años). Unos mil millones de años después del “big bang” el polvo y el gas empezaron a juntarse en nubes aisladas, y al aumentar la gravedad alrededor de estas nubes, con su incremento de masa, pudieron atraer más materia todavía y alcanzar de este modo mayor crecimiento. Así nacieron las galaxias primitivas y los sistemas solares. Si otra estrella pasaba a través del polvo de este sistema solar lo bastante cerca como para que se desprendieran fragmentos de ambas estrellas, es posible que estos restos se condensaran para formar planetas.

## La Tierra como planeta

Una vez iniciados en el contenido de la geología y algunos de sus conceptos fundamentales, podemos empezar con un examen detallado de la Tierra.

Como el resto de los planetas del Sistema Solar, la Tierra se formó hace más de 4 mil 500 millones de años. Probablemente se condensó a partir de rezagos del gas y polvo interestelar que acompañaban al Sol en su continuo viaje por el Universo.

**Cuadro 1. Principales teorías referentes a la génesis del sistema solar  
(Elaboración propia a partir de la compilación de material bibliográfico)**

Nombre	Autor y fecha	Catastrofismo / Uniformismo	Fuerza interna o externa	Material original	Gas o sólido	Caliente o frío	Suceso original	Fuerza	Forma original	Rotación alrededor del sol
Partículas	Kant 1755	Uniformismo	Interna	Sol futuro	Partículas		Turbulencia	Mecánica	Amorfa	Malamente explicada
Nebulosas	Laplace 1796	Uniformismo	Interna	Sol futuro	Gas	Caliente		Mecánica	Anillos	Postulado
Planetesimales y mareas	Chamberlain y Moulton 1900	Catastrofismo	Externa mareas	Sol	Gas luego sólido	Frío	Paso de una estrella	Mecánica	Dos protuberancias	Postulado
Ondas	Jeans Jéfreys 1916	Catastrofismo	Externa mareas	Sol	Gas	Caliente	Paso de una estrella	Mecánica	Filamento cigarro	Explicado
Estrella doble	Russel 1921 Lyttleton 1936	Catastrofismo	Externa mareas	Compañera del Sol	Gas	Caliente	Paso de una estrella	Mecánica	Filamento	
Diferenciación físico-químico	Rittmann 1941	Uniformismo	Interna	Sol o estrella	Gas	Caliente		Mecánica + ionización		Postulado
Polvo cósmico	Weizsacker 1944	Uniformismo	Interna	Nube cósmica	Polvo + gas	Frío			Disco	Postulado
Organización solar	Schmidt 1944	Uniformismo	Mixta	Nube cósmica	Polvo + gas	Caliente-frío		Mecánica + radiación	Disco	Postulado
De una supernova	Hoyle 1944	Catastrofismo	Externa	Compañera del Sol	Gas	Caliente-frío	Explosión		Disco	Explicado
De los planetas gemelos	Deuvilleir 1947	Catastrofismo	Externa mareas	Sol	Gas	Caliente	Paso de una estrella	Mecánica/electro-magnética	Dos chorros opuestos	Explicado
De la tubulencia y acrecimiento	Urey 1952	Uniformismo	Interna	Nube cósmica	Meteoritos + polvo	Frío			Disco	Postulado
Big-bang	Gamow, 1948	Catastrofismo				Caliente	Explosión			Postulado

Actualmente, se puede calcular la edad de la Tierra midiendo la pérdida de los isótopos radiactivos en las rocas corrientes y determinar así las eras geológicas. La Tierra se formó hace 4 mil 650 millones años. Las rocas más antiguas que se conocen marcan una edad de 3 mil 750 millones de años.

La Tierra no es un globo. A causa del movimiento de rotación adopta la forma de un esferoide, que es un elipsoide de revolución cuyo eje pasa por los polos norte y sur, y es puramente geométrico. Es decir, ésta sería la superficie que tendría la Tierra en el caso de que el radio polar fuese 21 kilómetros menor que el ecuatorial, y no existirían formas superficiales como las montañas y los valles. Actualmente se dice que la forma de la Tierra es la de un geoide, que es una superficie perpendicular a la plomada en cualquier punto de la Tierra.

La orientación sobre la superficie terrestre está basada en un sistema reticular de longitud y latitud. La latitud (paralelo) se refiere a los grados de arco al norte y al sur del ecuador. Las longitudes se miden al este y al oeste de una línea arbitraria norte-sur o meridianos.

### La Tierra en cifras

Parámetro	Valor	Otro
Diámetro ecuatorial	12 756,8 km	Radio Ecuatorial: 6 378 km
Diámetro polar	12 713,8 km	Radio polar: 6 357 km
Diferencia de diámetros	43,0 km	
Circunferencia media	40 009 km	
Inclinación del eje	23,50°	
Superficie terrestre	29,22 %	
Superficie de Mar	70,78 %	
Superficie total	510 millones km <sup>2</sup>	
Densidad media	5,527 g/cm <sup>3</sup>	
Masa	5,97*10 <sup>24</sup> kg	
Altura máxima	8 884 m (29 146 pies)	Everest
Profundidad máxima	11 034 m (36 200 pies)	Fosa de las Marianas (Islas Marianas del Norte)
Velocidad	200 km / seg	
Velocidad orbital	30 km / seg	

## Movimientos de la Tierra

Los cuatro movimientos más importantes son:

**Movimiento de traslación.** Se realiza alrededor del Sol en 365,26 días (365 días 5 horas 48 minutos 45 segundos) en una órbita elíptica ligeramente alargada. Este movimiento origina la inclinación del eje terrestre y las cuatro estaciones del año.

Cuando los rayos solares caen perpendicularmente sobre el ecuador se producen los equinoccios de primavera y verano; cuando caen de manera perpendicular a los trópicos dan origen a los solsticios de otoño e invierno.

**Movimiento de rotación.** Es el que realiza nuestro planeta alrededor de su eje, de oeste a este, en 23 horas, 56 minutos y 4 segundos, a una velocidad de 28 km/min. Los efectos más importantes de este movimiento son:

- El ensanchamiento de la Tierra en el ecuador y el achatamiento en los polos, que le da la forma de un geoide.
- La sucesión del día y la noche.
- La orientación espacial a través de los puntos cardinales: norte, sur, este y oeste.
- La fuerza de Coriolis, por la cual en el hemisferio norte los vientos se desvían en sentido de las agujas del reloj y en el hemisferio sur en el sentido opuesto. Efecto similar se produce en las corrientes marinas.

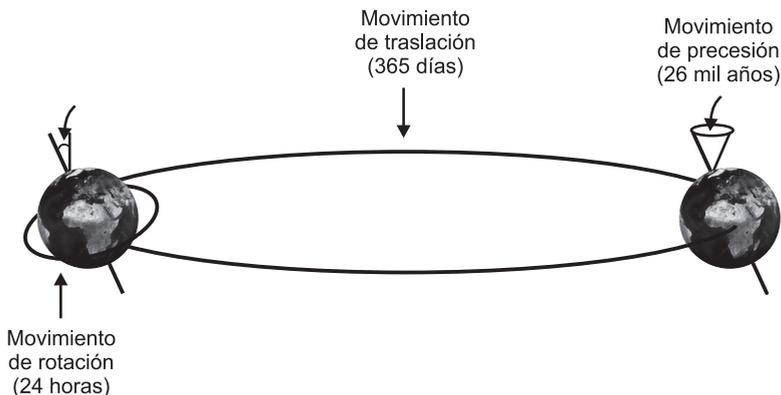


Fig. 8. Movimientos de la Tierra.

**Movimiento de precesión.** Es el movimiento de los equinoccios en la eclíptica y tiene una duración de 25 mil 868 años. Recibe también el nombre de Movimiento de Precesión de los Equinoccios e influye en la cantidad de radiación.

**Movimiento de nutación.** Este movimiento es en realidad una variación periódica en la inclinación del eje de la Tierra provocada por la atracción gravitacional del Sol y de la Luna. El eje experimenta cambios de pequeña amplitud en el ángulo de inclinación con periodos de 19 años.

### Estructura externa de la Tierra

En la Tierra se presentan cuatro “esferas”: atmósfera, hidrosfera, biosfera y litosfera.

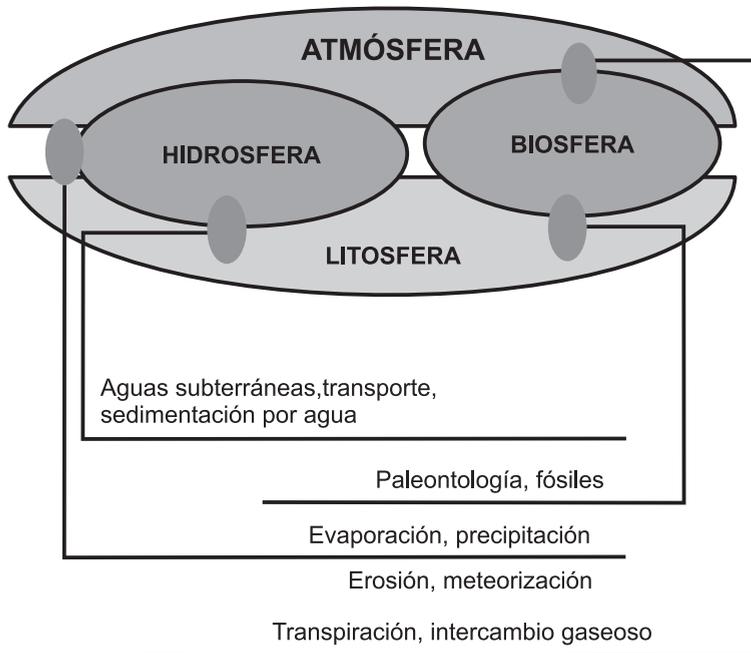


Fig. 9. Interrelaciones de las geoesferas.

### Estructura interna de la Tierra

La estructura interna del planeta se ha logrado determinar principalmente a través de una serie de estudios geofísicos, en especial los sísmicos, los cuáles brindan una idea de conjunto, tal como se puede observar en la figura siguiente:

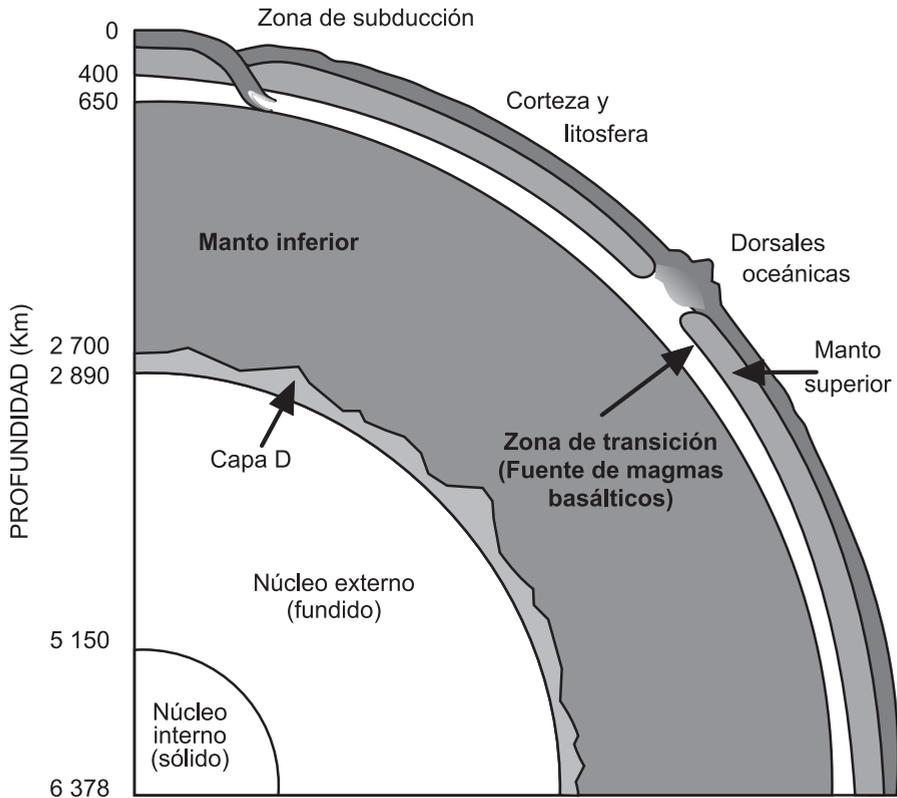


Fig. 10. Estructura interna de la Tierra (Adaptado de Beatty, 1990).

La Geología es la ciencia de la litosfera y sus relaciones con las otras “esferas”. En ese sentido, de la interrelación entre litosfera y atmósfera surge, por ejemplo, el estudio de los procesos de erosión y meteorización; la interrelación entre hidrosfera y litosfera da como objetos de estudio el agua subterránea, el transporte en el agua, el ambiente de río, entre otros. Mientras que de la relación entre biosfera y litosfera se pueden tomar como puntos de análisis la vida en las épocas pasadas, la evolución, los fósiles y, en general, la paleontología.

## Atmósfera

Capa gaseosa que rodea la tierra donde los gases se distribuyen por su densidad. Está constituida principalmente por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), anhídrido carbónico (0,03%), argón y neón (vapor de agua y polvo atmosférico). Partes:

- a. **Troposfera.** Zona inferior de la atmósfera donde se producen todos los fenómenos meteorológicos. Tiene un espesor de 12 km a 16 km.

- b. Estratosfera.** Zona superior en donde se halla la Capa de Ozono que impide el paso de los rayos ultravioleta. Se trata de una zona “tranquila” (carece casi de nubes) muy apreciada por sus cualidades aerodinámicas.
- c. Ionosfera.** Zona donde los gases están provistos de carga eléctrica. Allí se reflejan las ondas de radio y se originan las auroras boreales.

## Hidrosfera

Es la masa líquida de la Tierra, comprende los océanos, ríos y lagos. La mayor parte de su composición es de cloruros de sodio y magnesio.

## Litosfera

Es la envoltura sólida de la Tierra y tiene un espesor promedio de 50 km. Comprende dos capas: la corteza y el manto.

## Corteza terrestre

La corteza terrestre se divide en corteza oceánica y corteza continental. La primera incluye los continentes y los sectores del mar de baja profundidad; en la segunda se encuentran los sectores oceánicos de alta profundidad. La corteza continental tiene una composición química diferente de la corteza oceánica, ésta posee mayor cantidad de aluminio, hierro, magnesio, calcio y potasio.

### Abundancia promedio de elementos en las rocas de la corteza terrestre (Según Clarke y Washington, 1924)

Elemento	Porcentaje
Oxígeno	46,60
Silicio	27,72
Aluminio	8,13
Fierro	5,00
Calcio	3,63
Sodio	2,83
Potasio	2,59
Magnesio	2,09
Titanio	0,44
Hidrógeno	0,14
Fósforo	0,12

Fuente: Garland, 1971.

## Composición química de la corteza continental y corteza oceánica

Elemento químico	Corteza continental (en %)	Corteza oceánica (en %)
Cuarzo dorado ( $\text{SiO}_2$ )	60,2	48,7
Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	15,2	16,5
Óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	2,5	2,3
Óxido ferroso ( $\text{FeO}$ )	3,8	6,2
Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ )	3,1	6,8
Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ )	5,5	12,3
Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	3,0	2,6
Óxido de dipotasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	2,9	0,4

El análisis químico de los minerales de las rocas se expresa según el porcentaje de los óxidos, siendo la composición química de éstos del 99,50%: Cuarzo dorado = 59,07%, Óxido de aluminio = 15,22%, Óxido ferroso y Óxido férrico = 6,81%.

### Otras diferencias entre las cortezas

Parámetro	Corteza continental	Corteza oceánica
Peso específico	Menor (más liviano)	Mayor (más pesado)
Espesor	Grueso (30-70 km)	Delgado (6-8 Km.)
Altura respecto al nivel del mar	Va de -200 m hasta 8 884 m	Fondo del mar
Edad	Antigua	Más joven (jurásico)
Rocas	Ricas en sílice	Pobres en sílice

La corteza continental es más liviana que la corteza oceánica, por ello ésta se encuentra principalmente en regiones más profundas.

### Corteza continental

Capa superior conocida también con el nombre de SIAL por su composición de sílice y alúmina; forma los continentes y es granítica y rígida. Además, es un conglomerado de rocas magmáticas, sedimentarias y metamórficas que poseen uranio, potasio, torio y silicio. Su espesor varía de 10 km a 70 km. La discontinuidad\* de Moho se encuentra a 65 kilómetros y está separada del SIMA por la discontinuidad de Conrad.

\* Las discontinuidades son variaciones de velocidad de las ondas sísmicas.

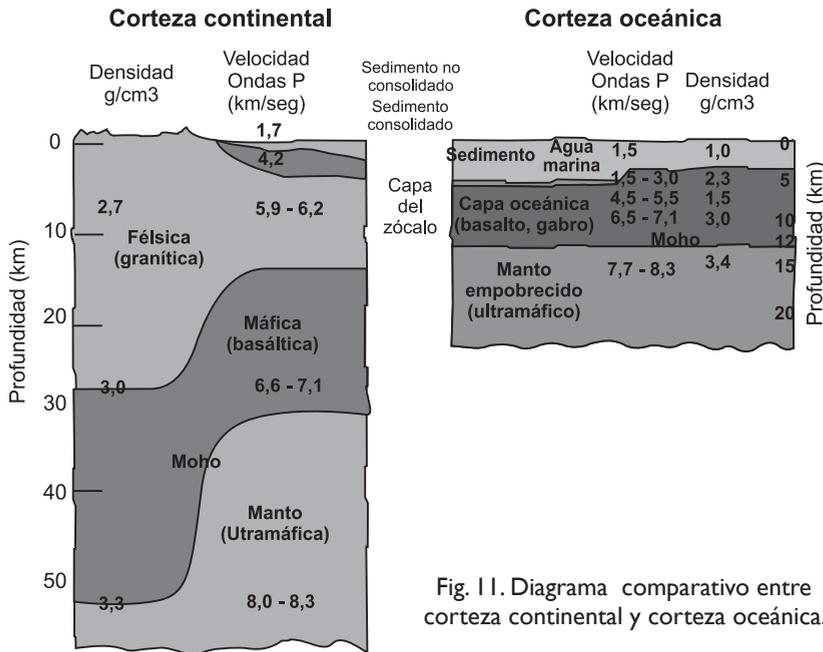


Fig. 11. Diagrama comparativo entre corteza continental y corteza oceánica.

## Corteza oceánica

Capa media conocida también con el nombre de SIMA por la alta presencia de sílice y magnesio. Es de característica basáltica y de mayor densidad que el SIAL. Su espesor varía de cinco a ocho kilómetros. La discontinuidad de Moho se encuentra a cinco kilómetros.

## Cobertura sedimentaria

Es discontinua, de espesor y composición variables. Esta película sedimentaria se compone de material derivado de las rocas primarias debido a la actividad incesante de los agentes externos de erosión, transporte y deposición.

La corteza terrestre limita con el manto en la discontinuidad sísmica de Mohorovicic.

## Manto

Cascarón que limita en su parte inferior con la discontinuidad de Gutenberg y en la parte superior con la discontinuidad de Mohorovicic. Está constituida principalmente por peridotitas y pirolitas con una densidad que varía entre 3,3 y 5,7.

El manto superior está dividido del manto inferior por una zona llamada astenosfera, de donde procede la energía y las fuerzas responsables de la expansión del fondo oceánico, de la deriva continental, de la orogénesis (conjunto de procesos que originan las cadenas montañosas) y los terremotos mayores. Alcanza una profundidad promedio de 2 mil 900 kilómetros.

Se cree que la astenosfera es la zona donde se genera el magma, nombre general con el que se denomina a las rocas ígneas formadas por el enfriamiento y la solidificación de materia rocosa fundida. Tiempo atrás, el proyecto Upper Mantle Project–Mohole se trazó el objetivo de explorar el manto, pero sólo pudo llegar a los 180 metros de profundidad y fue abandonado en 1966 por serias dificultades técnicas y económicas.

## **Núcleo**

Se le conoce también como NIFE por su composición predominante de hierro y níquel. En su parte más externa tiene una conformación líquida respecto a las ondas transversales S; en su parte interna es sólido. Entre ambas zonas se halla la discontinuidad de Lehmann. El núcleo está separado del manto por la discontinuidad de Gutenberg. Su densidad es de 12. Esta zona es una consecuencia de la atracción gravitatoria sobre materiales de diferente densidad.

## **Biosfera**

Es la esfera de la vida, constituida principalmente por carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y fósforo.

## **Métodos de investigación**

### **Perforaciones**

La perforación (o sondaje) más profunda del mundo, de aproximadamente 12 kilómetros, se realizó en la extinta Unión Soviética, aunque de 6 370 km del radio del globo terrestre, se perforaron solamente 12 km. La ventaja de los sondajes es la posibilidad de tomar muestras de distintas profundidades.

### **Métodos geofísicos**

- a) **Sismología:** por medio de ondas sísmicas se puede detectar discontinuidades, cambios petrográficos, diferenciar entre rocas sólidas y rocas fundidas. Este método es el más importante en la investigación de la geología del interior de la tierra.

b) **Gravimetría:** detecta anomalías de la gravedad, las cuales permiten el cálculo de la densidad y/o del espesor de la corteza terrestre.

## Volcanología

Algunos volcanes tienen su cámara de magma a grandes profundidades (manto superior). El análisis de estas rocas volcánicas (*kimberlitas*) da información de esas profundidades.

## Continentes y océanos

Las principales características de la superficie terrestre se observan inspeccionando cuidadosamente un globo terráqueo, en donde se aprecia la distribución de los continentes y océanos. La tierra firme sólo representa el 29% de la Tierra, el resto lo cubren los océanos.

Superficie de los continentes	Superficie de los océanos	
	Mares someros	Mares profundos
9 * 107 km <sup>2</sup>	27 * 107 km <sup>2</sup>	
18 %	53 %	
29 % 15 * 107 km <sup>2</sup>	71 % 36 * 107 km <sup>2</sup>	

## Continentes

Grandes masas rocosas (magmáticas, sedimentarias o metamórficas) que se encuentran en cota positiva o altura con respecto al nivel del mar. Ocupan sólo el 30% de la superficie terrestre. Al hemisferio norte se le conoce como Hemisferio Continental, pues contiene la mayor superficie continental. Son cinco y están surcados por cordilleras: América, Eurasia, África, Antártida y Oceanía. Las montañas más elevadas del mundo conforman la cordillera del Himalaya, donde tenemos al monte Everest, con 8 884 metros de altura.

## Océanos

Parte ocupada por agua marina que representa el 70% de la superficie terrestre. Al hemisferio sur se le conoce como el Hemisferio Océánico pues está básicamente cubierto por el océano. Los océanos son cinco, el más extenso es el Pacífico, luego tenemos al Atlántico, Índico, Glacial Ártico y Antártico. Presenta las zonas más profundas, conocidas como fosas, la mayor es la Fosa de las Maria-

nas, con 11 mil 34 metros de profundidad. Además están las de Guyots, Montes Marinos, Dorsales, entre otras.

En nuestros días, los rasgos topográficos están ligados a dos sistemas que rodean al globo terráqueo, estos son el Cinturón Circunpacifico y el Cinturón Alpino-Himalayense. Ambos se caracterizan por anomalías geofísicas de diverso tipo y son zonas de gran actividad sísmica y volcánica.

El resto de la corteza corresponde a los escudos que son regiones relativamente estables.

### Curva hipsográfica

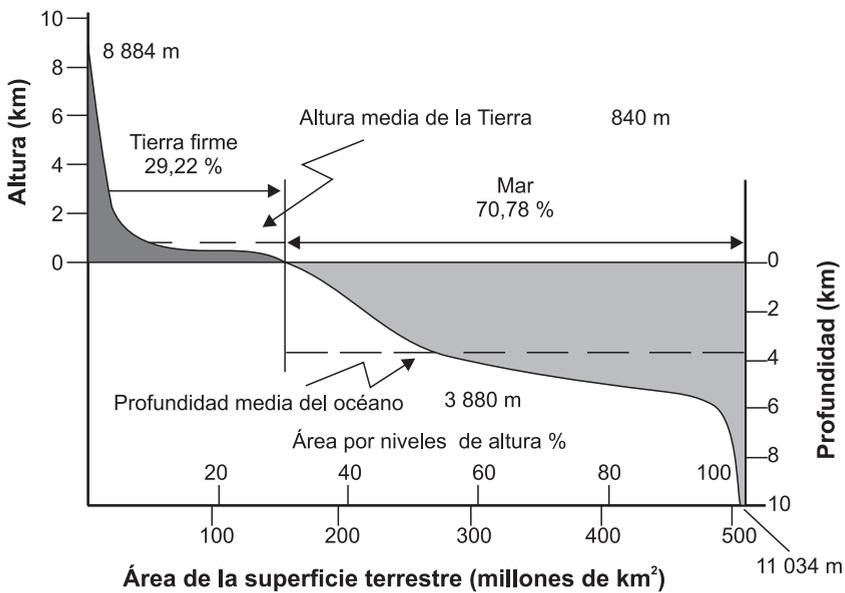


Fig. 12. Curva hipsográfica.

La Tierra muestra una distribución bimodal de las alturas, es decir tiene dos cotas más frecuentes: cuatro mil 700 metros bajo el nivel del mar y 100 metros sobre el nivel del mar. Si existiera un tipo de corteza, se esperaría matemáticamente sólo una cota más frecuente con una distribución gaussiana. Pero la bimodalidad de la distribución de cotas dice claramente que hay dos tipos de corteza: uno que se encuentra generalmente en los 4 mil 700 metros bajo del nivel del mar (corteza oceánica) y otro mayormente en los 100 metros sobre el nivel del mar (corteza continental).

### Distribución de las alturas (metros)

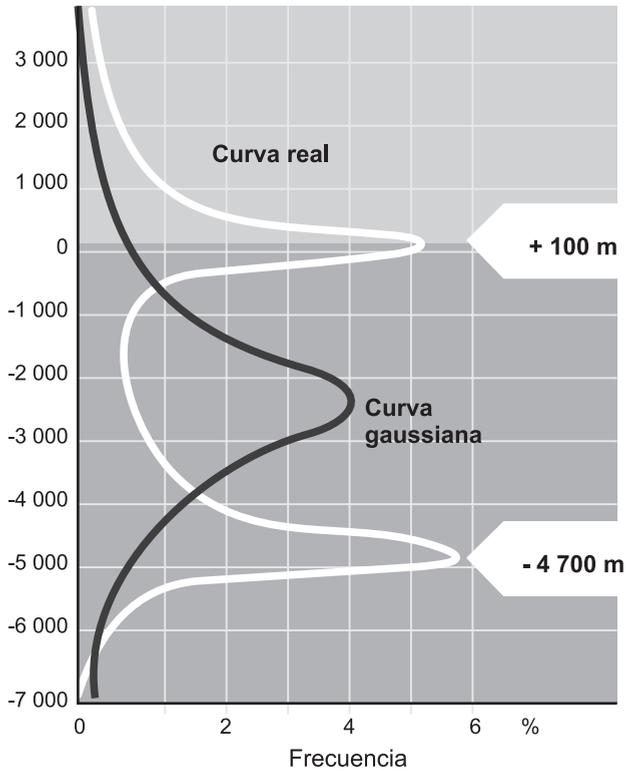


Fig. 13. Distribución de elevaciones.

## Isostasia

El concepto de equilibrio isostático de materiales superficiales ha sido perfeccionado desde la publicación de las hipótesis de Airy y Pratt, que han sido llamadas isostasia. En esencia, estas hipótesis sostienen que el peso total de roca entre el centro de la Tierra y la superficie terrestre en cualquier punto es constante, cualquiera sea su posición en ella. De esta manera la superficie terrestre puede ser considerada como isostáticamente equilibrada.

Las consecuencias que se deducen del concepto de equilibrio isostático son:

- Las rocas de la superficie deben ser considerablemente menos densas que las que se encuentran en la parte inferior.
- El substrato de los materiales superficiales debe comportarse como un fluido.

- La corteza no debe ser muy resistente.
- Se ha reportado anomalías negativas en los macizos montañosos, lo cual indica que los materiales que los constituyen son de baja densidad.
- La fuerza de la gravedad no es constante en toda la superficie terrestre. Una partícula situada sobre ella es atraída con diferente densidad hacia la Tierra según su elevación.

Puede decirse entonces que los continentes se comportan como una masa de SIAL (2,7) en equilibrio isostático sobre un SIMA (3,2) profundo de densidad mayor y dotado de cierta viscosidad. Esta estructura sería algo parecida a los témpanos de hielo que flotan en el mar.

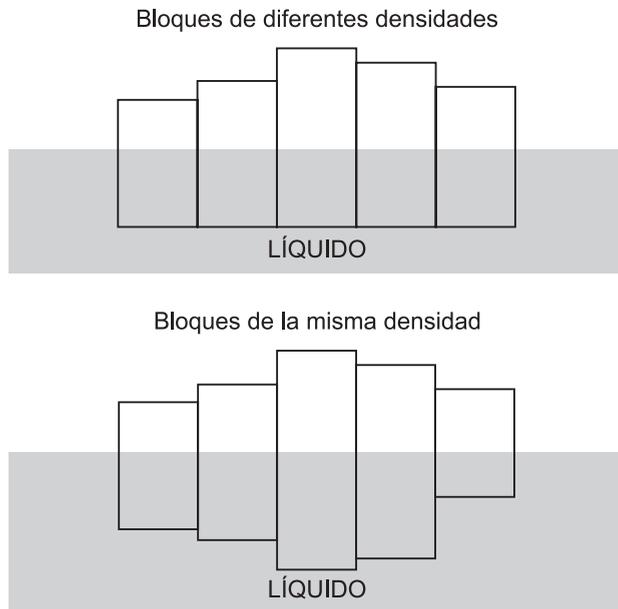


Fig. 14. Esquemas de equilibrio isostático.

## Deriva continental

Hoy, la gran mayoría de geólogos acepta como un hecho que la distribución actual de los continentes es el resultado de la separación y unión de formaciones previas. La historia de la Teoría de la Deriva Continental, formulada por Alfred Wegener en 1912, es un episodio particularmente apasionante de la historia de las Ciencias de la Tierra.

Esta teoría está cambiando la visión científica de varias especialidades de la Geología porque las corrientes del mar y el clima global dependen de la configuración de los continentes; la evolución y el desarrollo de la vida dependen de la separación de los continentes; y los modelos geológicos clásicos de la geología estructural, de la formación de montañas, de la formación de depósitos minerales y de la sismología no funcionan con la deriva continental.

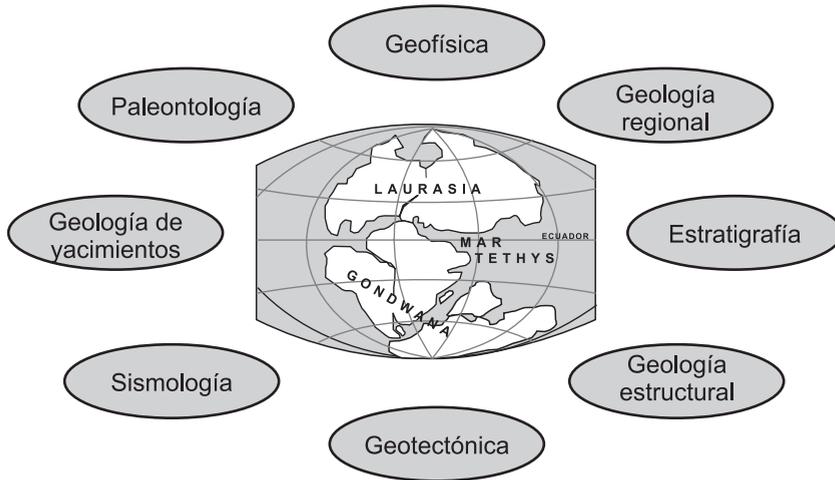


Fig. 15. La deriva continental y su influencia en algunas Ciencias de la Tierra.

La hipótesis de la deriva de los continentes fue propuesta por Alfred Wegener en su libro *El origen de los continentes y de los océanos* y se basó en los siguientes argumentos:

1. **Ajuste de los continentes.** Una simple mirada a un atlas o a un globo terráqueo permite ver que las costas atlánticas de Sudamérica y África tienen contornos bastante parecidos. La semejanza del contorno dibujado en el talud continental en la parte oriental de Sudamérica y el mismo contorno en el talud continental de África occidental es extraordinaria. El mejor ajuste visual del contorno submarino fue hecho en 1958, a 200 metros de profundidad, y refuerza la idea de que Sudamérica y África estaban unidas.
2. **Comparación de la geología.** En sentido general los tipos de argumentos que se buscan son semejanzas en la sucesión estratigráfica, en la fauna y la flora conservadas en ella y en los cinturones orogénicos que cruzan la separación.

3. **Glaciación permocarbonífera.** Los depósitos glaciales aportan generalmente una prueba mucho mejor (*Tillita*), que en muchos lugares alcanzan un espesor de 600 metros. Asimismo, hay cantos rodados erráticos en Sudamérica que provienen de África.
4. **Argumentos paleomagnéticos.** La datación de la ruptura es de 200 millones a 50 millones de años (comienzos del mesozoico). Se produjeron los siguientes montajes:
  - a. **Gondwana.** Tenía una antigüedad de 500 millones de años y comprendía África, América del Sur, Australia y la India.
  - b. **Laurasia.** Con 370 millones de años, agrupaba a los actuales territorios del hemisferio norte: América del Norte, Groenlandia y Eurasia.
  - c. **Pangea.** Es el gran supercontinente que resultó de la unión de Gondwana y Laurasia. Su antigüedad era de 280 millones a 190 millones de años.

### Interpretación de la teoría

Wegener parte de la hipótesis de que hace unos 250 millones de años los continentes estaban unidos en un solo bloque que él denomina Pangea (“Toda la Tierra”). Desde esa perspectiva, Sudamérica encajaba con África y Norteamérica estaba unida a Europa; la Antártida y Australia también estaban unidas y la India y Madagascar formaban un solo bloque, que a su vez estaba unido a Sudamérica.

Con el tiempo apareció una grieta entre África y América que más tarde vino a ser el Océano Atlántico; los otros continentes también se separaron. Al estar constituidos de una ligera corteza y flotar sobre un medio más denso y fluido se movieron bajo la influencia de dos fuerzas: el efecto de las mareas, que los condujo al oeste, y el de la fuerza centrífuga, que causó en teoría el movimiento gradual hacia el ecuador.

Además, la Teoría de Deriva Continental contiene varios puntos nuevos:

- Los continentes no son estables, se mueven.
- Existen dos tipos de corteza: corteza continental y corteza oceánica.
- La fuerza para mover los continentes viene de flujos de convección y de la rotación de la Tierra.
- En las dorsales (cordilleras) centrales oceánicas se forma corteza oceánica nueva.

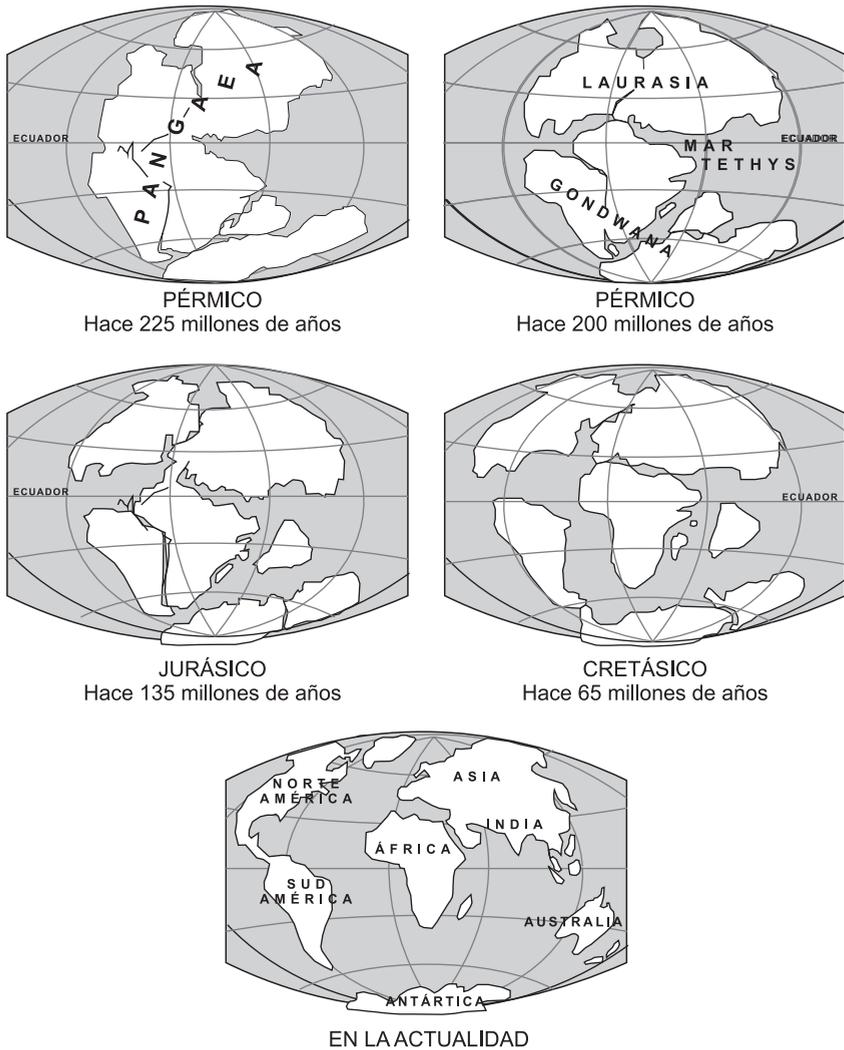


Fig. 16. Deriva continental en los últimos 250 millones de años.

- En algunas partes del mundo las placas se chocan y se puede producir la formación de montañas.
- La placa oceánica, como corteza de mayor densidad, algunas veces se hunde debajo de la placa continental (subducción).
- Algunas veces un continente se divide en dos. Ejemplo: África y América del Sur.

- En tiempos pasados la configuración de los continentes era totalmente diferente: en el paleozoico y el mesozoico existió Gondwana, un gran continente que agrupaba a lo que es hoy Antártida, América de Sur, Australia, África y la India.
- Las rocas del fondo marino son relativamente jóvenes (del jurásico); por el contrario, las rocas más antiguas se encuentran en los continentes.

## **Expansión del fondo oceánico**

La Teoría de la Expansión del Fondo Oceánico fue propuesta por el geólogo estadounidense Harry Hammond Hess en 1960. Esta teoría llegó a constituir la piedra angular de la Tectónica de Placas.

Esta teoría propone que el piso o suelo de los fondos oceánicos se está separando o expandiendo continuamente a partir de estrechas fracturas situadas al centro de las cordilleras submarinas o dorsales, con lo cual dos puntos situados uno a cada lado de la dorsal quedan más alejados entre sí. Los flujos volcánicos ascienden desde el manto a través de estas fracturas y dan lugar a una nueva corteza.

Esta teoría predice que la edad de las rocas magmáticas del zócalo subyacente a una cuenca oceánica debería aumentar progresivamente con la distancia a una dorsal. Las rocas más antiguas en el fondo oceánico no tienen más de 200 millones de años.

A partir de 1960 se examinó por primera vez y en detalle la topografía de amplias zonas de los fondos oceánicos. Este logro fue posible gracias al perfeccionamiento de la técnica, propiciada por la Segunda Guerra Mundial.

El conocimiento de la roca sólida del fondo del océano es vital para nuestro concepto de expansión de dicho fondo y de migración de los continentes. Estos movimientos se producen a razón de 125 centímetros por año en el Atlántico y de ocho a diez centímetros en el Pacífico. La expansión máxima ha oscilado de 20 cm a 24 cm por año en el Océano Índico.

Las dorsales oceánicas son zonas de ascenso de material procedente del manto, principalmente en forma de material basáltico fundido, que se derrama lateralmente generando una corteza oceánica que ensancha gradualmente la amplitud del océano y separa poco a poco los continentes que se encuentran en los lados de una dorsal activa.

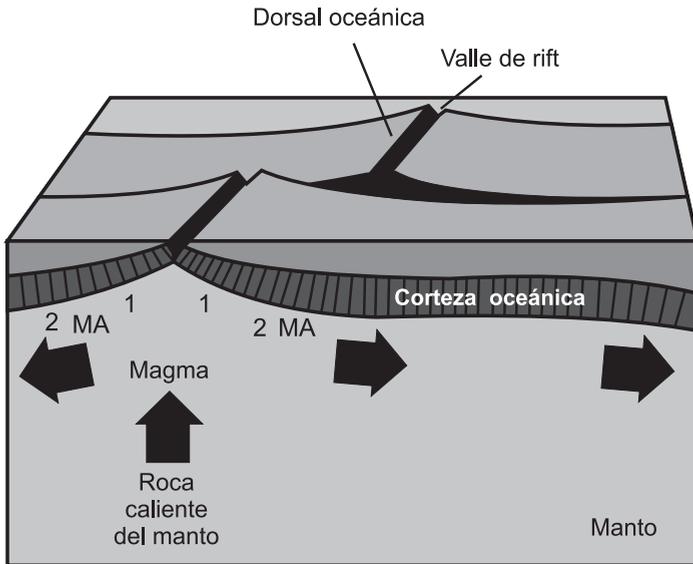


Fig. 17. Expansión del fondo oceánico.

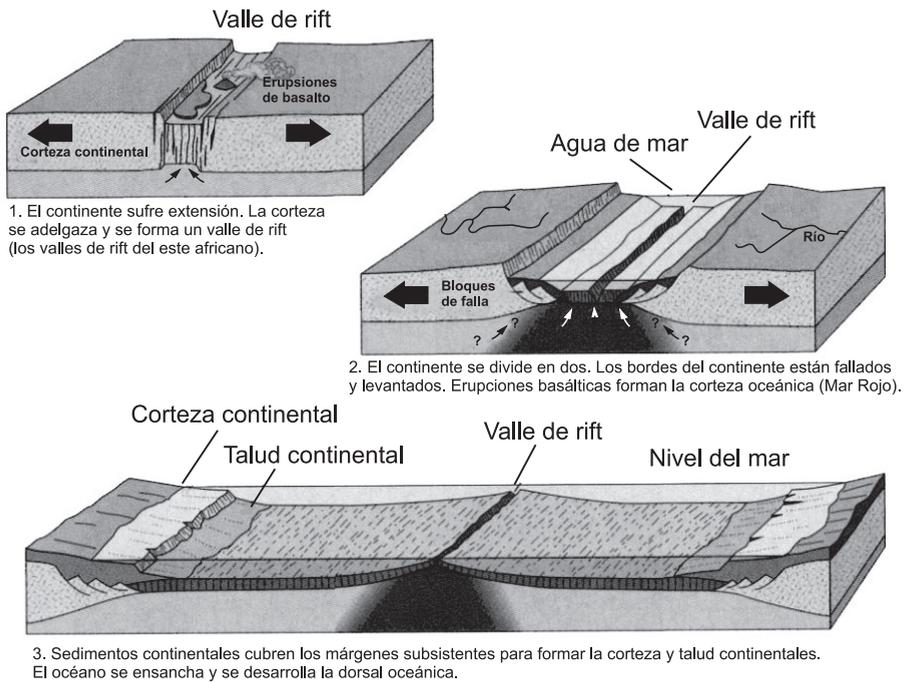


Fig. 18. Esquema de la ruptura de una placa continental y la formación de una placa oceánica nueva.

## Contextos orogénicos

Las orogenias se han producido en bordes de placas o junto a ellas donde había una componente de acortamiento. Existen los siguientes tipos:

- a) **Aleutiana** (de Arco de Islas). Implica la existencia de corteza oceánica en ambos lados del orógeno.
- b) **Andina**. Supone corteza oceánica a un lado y corteza continental al otro.
- c) **Himalaya**. Implica la convergencia de dos placas continentales.

## Teoría de Tectónica de Placas

Como se vio, la Teoría de la Deriva Continental de Alfred Wegener existe desde 1915 pero no tuvo aceptación en esa época. En los años sesenta del siglo XX nuevas investigaciones del fondo del mar y de regiones montañosas como los Andes, permitieron la postulación de una nueva teoría global geotectónica, la Teoría de Tectónica de Placas, con la cual desaparecieron otras teorías antiguas como las de los geosinclinales o la expansión o contracción de la Tierra.



Fig. 19. Placas tectónicas.

Todas las evidencias que en su momento se citaron para apoyar la deriva continental ahora se usan como pruebas vitales para sustentar la Tectónica de placas. Esta teoría explica casi la mayoría de los fenómenos geológicos, como el de la deriva continental, la expansión del fondo oceánico, las estructuras corticales y los modelos de actividad sísmica y volcánica de la Tierra.

Las placas son bloques laminares o segmentos de litosfera que se generan en las fracturas centrales de los océanos y se hunden en las fosas abisales o en el borde de los continentes. Además, unas se desplazan con respecto a otras. Sus espesores fluctúan de 100 a 150 kilómetros. La palabra placa fue usada por primera vez en 1967, por Jason Morgan.

Con referencia a la base de su mecanismo de desplazamiento, las placas pueden ser convergentes, divergentes y paralelas. Hay tres tipos de bordes de placas:

- a) **Constructivo**, donde se crea una nueva corteza; se halla en las dorsales oceánicas.
- b) **Destructivo o sumidero**, se encuentra en las fosas oceánicas profundas.
- c) **Conservativo**, las placas no ganan ni pierden área superficial.

Toda actividad sísmica, volcánica y tectónica se localiza cerca de los bordes de las placas.

Para simular el movimiento de las placas se ha elaborado varios modelos teóricos, uno de los más aceptados es el de las Corrientes de Convección Oceánicas, las cuales pueden presentarse en la astenosfera entre los 100 y 400 kilómetros de profundidad.

Para entender mejor este modelo se compara la Tierra con un recipiente de agua que se está enfriando y dentro de él se desarrollan corrientes de convección. El agua caliente sube por el centro y se extiende por la superficie, se enfría y baja por los lados.

De manera análoga al modelo, sugiere que existen inmensas corrientes de convección dentro de la Tierra, que suben por dentro de la cordillera submarina y bajan siguiendo los bordes de las placas.

En el globo terrestre se ha delimitado siete placas principales y 20 secundarias. Las principales son: Pacífica, Norteamericana, Sudamericana, Australiana, Antártica, Africana y Euroasiática.

La Placa de Nazca, ubicada en el Pacífico Sur, presenta una antigua cordillera submarina llamada Dorsal de Nazca que es inactiva. Por información del magnetismo obtenido se sabe que el fondo marino en la placa de Nazca (entre los 6° S y 11° S) se expande de 8,2 cm a 8,3 cm al año.

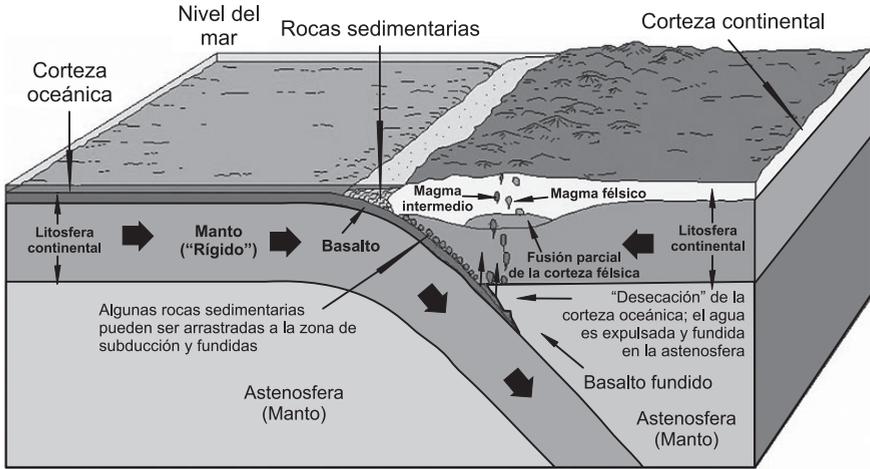


Fig. 20. Colisión de una placa oceánica y una continental por subducción.