Quebrada Corralitos en el volcán Nevado del Ruiz
Fotografía de Zoraida Chacón Ortiz,
Servicio Geológico Colombiano.

CAPÍTULO 2

MILLONES DE AÑOS

en una taza de café

Catalina Sánchez Caballero
Juan Carlos Silva Tamayo
Karina Andrea Portilla Mendoza
Gloria Prieto Rincón
Servicio Geológico Colombiano

Siavosh Sadeghian Khalajabadi
Cenicafé

Biósfera
Atmósfera
Criósfera
Hidrósfera
Litósfera
Litosfera

El sistema Tierra y las relaciones entre los diferentes subsistemas (geósfera, hidrósfera, criósfera, atmósfera y biósfera
Autor: Karina Andrea Portilla Mendoza

EL SISTEMA TIERRA

Nuestro planeta: la tierra es un cuerpo celeste en el que interactúan diferentes elementos a través de un sinnúmero de procesos. Para entender este gran sistema y la complejidad de los diferentes procesos que en él ocurren se requiere de un enfoque multidisciplinario que involucra una infinidad de conceptos químicos, físicos, biológicos y matemáticos.

Durante siglos, el hombre ha analizado los ritmos que marcan las dinámicas del sistema Tierra, así como los cambios abruptos o sutiles que afectan la estabilidad e interacción entre los diferentes subsistemas que lo conforman, como, por ej., geósfera, hidrósfera, criósfera, atmósfera y biósfera.

Estos subsistemas se unen e interactúan a través de límites difusos mediante procesos y ciclos que, con el paso del tiempo, almacenan, transforman e intercambian materia y energía, haciendo de nuestro hábitat un sistema complejo y dinámico, cuyos cambios son el reflejo de las relaciones entre estos.

En el estudio del sistema Tierra participan científicos de diferentes disciplinas, como geología, biología, oceanografía, climatología, física, química, matemáticas y agronomía, entre otras.

Los geocientíficos, más conocidos como *geólogos*, se enfocan principalmente en el estudio de la geósfera, y no solo realizan actividades de ciencia "pura", sino también aplicada, que van desde el estudio de los procesos de formación de minerales y rocas, hasta el entendimiento de yacimientos minerales y la explotación de recursos energéticos (petróleo, gas, carbón, elementos geotérmicos).

Una de las actividades más representativas que realizan los geocientíficos es la elaboración de mapas geológicos. En el diseño de estos mapas, que son la base del entendimiento de la parte más superficial de la geósfera, participan profesionales de diferentes especialidades. Por ejemplo, los mineralogistas se encargan de la identifi-

cación de los minerales que componen las rocas, los petrólogos se encargan de la clasificación de las rocas (ígneas, sedimentarias, metamórficas), los paleontólogos identifican y clasifican el registro fósil y los geólogos estructurales se ocupan de la localización de fallas geológicas. En la elaboración de mapas geológicos también participan geógrafos que ayudan a mejorar la información sobre el terreno; pedólogos, que identifican y clasifican los suelos, y los hidrólogos, que identifican las fuentes hídricas, entre otros. La información plasmada en los mapas geológicos contribuye a entender los procesos superficiales de la geósfera y parte de los procesos subsuperficiales que ocurren en ella. Es así como en actividades aplicadas en la exploración de recursos minero-energéticos e hídricos intervienen los geocientíficos del subsuelo, conocidos como *geofísicos*, que utilizan herramientas tecnológicas avanzadas (sísmica, gravimetría, geoeléctrica, etc.) para mapear el subsuelo.

Los oceanógrafos, hidrólogos, limnólogos, climatólogos, físicos y químicos participan generalmente en actividades que ayudan a entender otro subsistema del sistema Tierra: la hidrósfera. Mientras los oceanógrafos se encargan de entender los procesos físico-químicos que controlan los océanos, los hidrólogos y limnólogos estudian dichos procesos en ríos y lagos. Los climatólogos, quienes se encargan de estudiar el comportamiento del clima, ayudan a los oceanógrafos, hidrólogos y limnólogos a mejorar el entendimiento de la hidrósfera y el balance hídrico de estos reservorios de agua. Los climatólogos, junto con los físicos y químicos, estudian el comportamiento de la esfera más exterior del sistema Tierra: la atmósfera. El estudio de la hidrósfera también se ve complementado por los glaciólogos, quienes estudian los procesos que afectan las aguas congeladas (criósfera) en el planeta (glaciares, nevados, icebergs).

Los biólogos, botánicos, microbiólogos y bioquímicos se encargan de estudiar el comportamiento de la biósfera terrestre. Estos, junto con los paleontólogos, han emprendido el estudio del comportamiento de los seres vivos en el pasado. Mediante el estudio de los seres vivientes actuales se puede inferir cómo fue el comportamiento y evolución de especies animales y vegetales a lo largo del tiempo geológico. El trabajo de los biólogos y paleontólogos también contribuye a la planeación de actividades aplicadas, como la restauración ecológica, esencial para mitigar los impactos generados por problemas como el cambio climático, la deforestación y la mala planeación ambiental.

Nosotros los humanos también hacemos parte del sistema Tierra y modificamos continuamente, de forma directa e indirecta, el equilibrio de los diferentes componentes del sistema Tierra con actividades como la agricultura, ganadería y minería. Como respuesta, el sistema Tierra busca restablecer su equilibrio, generando procesos retroalimentadores, como el cambio climático. Sin embargo, las respuestas a estas acciones dependen de la estabilidad o inestabilidad del sistema Tierra como un todo y de su capacidad de resistencia a los cambios que ocurren en cada subsistema. Con el paso del tiempo estos cambios desencadenan una serie de interconexiones que repercuten directamente en nuestro entorno (p. ej., desertificación, degradación de suelos, acidificación y desoxigenación oceánica y extinción de especies).

Dada la complejidad de las interacciones entre los diferentes subsistemas del planeta Tierra y el hombre, hoy en día los científicos están trabajando de forma multidisciplinaria. El trabajo conjunto de científicos de diferentes ramas del conocimiento no solo posibilita mejorar el entendimiento de los procesos y retroalimentaciones que afectan al sistema Tierra, sino también generar información cuantitativa más confiable sobre la cual las agencias tomadoras de decisiones generan planes estratégicos de prevención y mitigación de cambio ambiental. Esta información también es utilizada para idear planes estratégicos de desarrollo económico en sistemas autosostenibles.

Cascada en la Sierra Nevada del Cocuy.
Fotografía del Servicio Geológico Colombiano

En los siguientes párrafos explicaremos los diferentes subsistemas que componen el sistema Tierra, la forma como estos interactúan entre sí y cómo las actividades humanas se ven afectadas por las retroalimentaciones del mismo sistema.

Geósfera

La geósfera, el subsistema más relevante en el ámbito geológico, comprende la litósfera o corteza terrestre (corteza continental y corteza oceánica), que es rígida y ocupa aproximadamente los primeros cien kilómetros por debajo de la superficie terrestre. Debajo de la litósfera se encuentra el manto (2885 km de espesor), que se divide en la astenósfera y la mesósfera, y que presentan un comportamiento plástico y rígido, respectivamente. La parte más interna de la geósfera se conoce como núcleo (3400 km de espesor), que es líquido en su parte exterior y sólido en su interior.

Los subsistemas atmósfera, hidrósfera, criósfera y biósfera, explicados más adelante, están en continua interacción con la corteza terrestre. La evolución de la corteza obedece a la ocurrencia de varios procesos que, a lo largo del tiempo, tienden a repetirse, aunque se vean afectados por diferentes factores. Estos fenómenos fueron advertidos por James Hutton, geólogo, médico, químico, naturista, agrónomo y granjero, quien, a mediados del siglo XVIII, realizando observaciones detalladas sobre su entorno natural, emprendió sus propios análisis en los que especificó que los procesos naturales que ocurren actualmente

en la superficie de la Tierra también ocurrieron en el pasado y ocurrirán en el futuro (teoría del uniformitarismo: "el presente es la clave del pasado").

Según Hutton, los procesos naturales son lentos y graduales, y no necesariamente ocurren a igual intensidad ni ritmo. Estos procesos, que afectan la corteza terrestre y demás componentes del sistema tierra (atmósfera, hidrósfera, criósfera y biósfera) mediante las múltiples interacciones comprenden un tiempo. Hutton consideró dicho tiempo en un sentido más amplio que el bíblico, y lo nombró de forma filosófica, científica y hasta revolucionaria para su época, "*tiempo profundo*", que corresponde a lo que ahora llamamos "*tiempo geológico*".

El tiempo geológico corresponde a divisiones temporales que representan los principales eventos geológicos y biológicos que han afectado la Tierra desde su formación hasta la actualidad, y que son observables en el registro geológico. Cuando hablamos de *tiempo geológico* nos expresamos en millones de años (Ma). Estos últimos siempre contados desde el presente hacia el pasado. En este momento sabemos que nuestro planeta cuenta con una larga historia que empezó hace 4600 Ma.

Actualmente, los geocientíficos reconocen que la teoría de uniformitarismo no es completamente válida y que la evolución e interacción de los diferentes subsistemas del sistema Tierra han cambiado a lo largo del tiempo.

Un ejemplo es la influencia que tuvo la falta de oxígeno en la atmósfera terrestre, hasta hace 2400 Ma, y que hizo que la transformación de las rocas en la superficie terrestre y la evolución de la vida fueran gobernadas por procesos completamente diferentes a los actuales.

De igual manera, se puede advertir la ausencia de actividad tectónica (procesos de deformación de la corteza terrestre a gran escala) hasta hace 3400 Ma.

Solo hasta hace 1500 Ma el aumento de la actividad tectónica global dio paso al incremento del oxígeno atmosférico a niveles que pudieran sostener la vida a escala global. De acuerdo con varios estudios, la creación de grandes continentes aumentó las áreas terrestres disponibles para interactuar con la atmósfera. De esta interacción se deriva un incremento en el aporte de nutrientes (específicamente de fósforo) desde el continente al océano, lo que terminó favoreciendo el aumento de la biomasa de microorganismos fotosintéticos productores de oxígeno (cianobacterias) y, por tanto, la liberación de oxigeno del océano a la atmósfera.

Otro ejemplo que evidencia la interacción entre el subsistema geósfera y otros subsistemas del sistema Tierra es la capacidad que esta tiene para controlar el clima terrestre. Durante periodos de alto volcanismo, la adición rápida de grandes cantidades de CO_2 volcánico a la atmósfera causa calentamiento global y genera cambios fisicoquímicos en el mar (acidificación y desoxigenación oceánica) que pueden ocasionar extinciones biológicas en masa. Durante periodos de creación de grandes cadenas montañosas, en cambio, el CO_2 atmosférico es secuestrado por medio de la interacción entre la atmósfera y la corteza continental, un proceso llamado *meteorización química*. Este secuestro de CO_2 atmosférico favorece la disminución de las temperaturas terrestres y, al mismo tiempo, de la acidificación y desoxigenación oceánica.

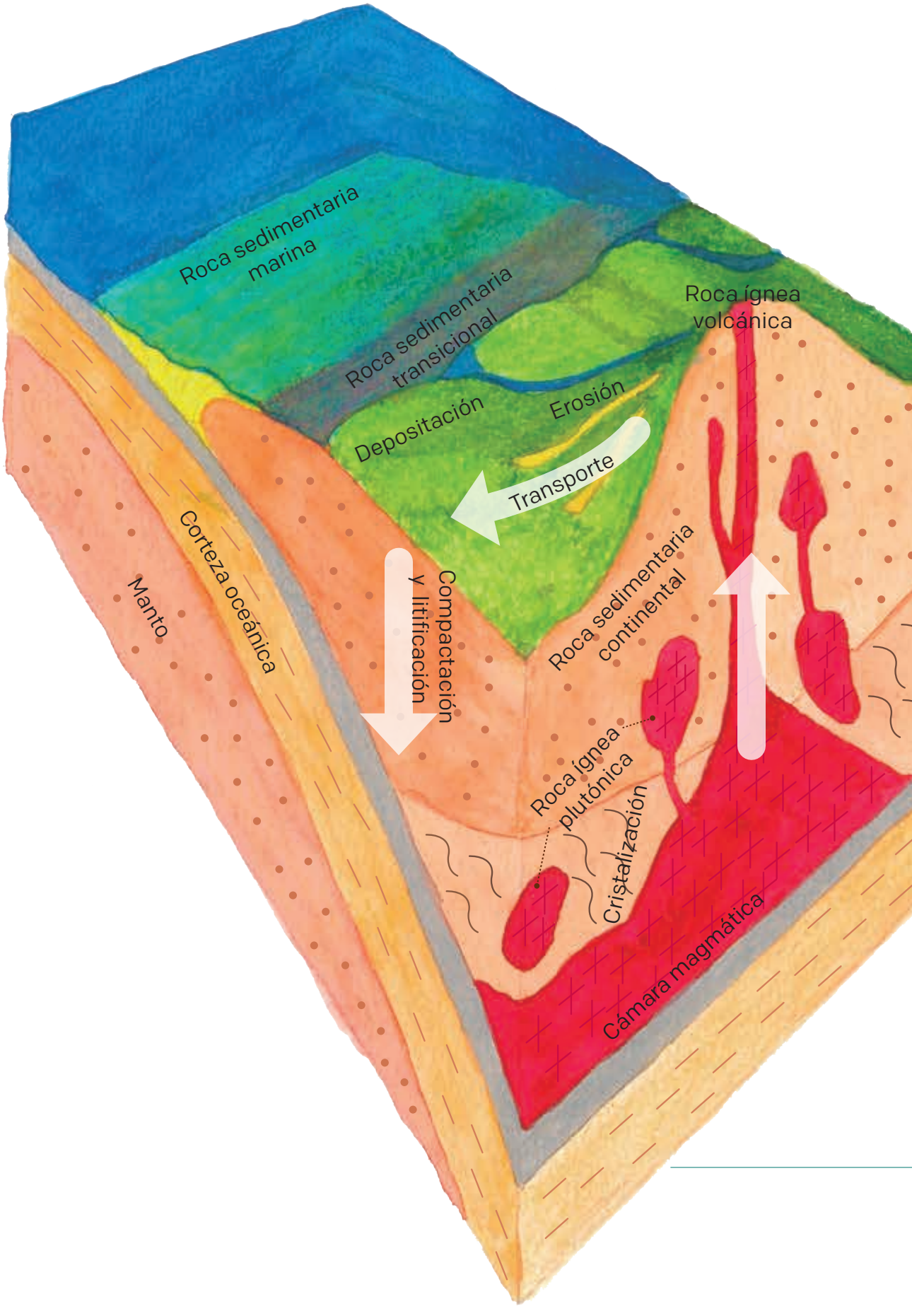
Es importante resaltar que la actividad tectónica es un proceso netamente endógeno del sistema Tierra. La tectónica de placas es el proceso responsable del movimiento de las capas externas de la Tierra (corteza terrestre y astenósfera). Este proceso no solo controla en gran parte la evolución de la corteza terrestre, sino que es el responsable de la generación de los principales rasgos fisiográficos de nuestro planeta. A partir de esta dinámica podemos apreciar, a lo largo de la historia geológica, la aglomeración y separación de masas continentales y la creación de cuencas oceánicas, así como la generación de cadenas montañosas, en procesos conocidos como *orogenias*.

Neógeno
Paleógeno
Cretácico
Jurásico
Triásico
Pérmico
Carbonífero
Devónico
Silúrico
Ordovícico
Cámbrico
Cenozoico
Mesozoico
Paleozoico
Fanerozoico

La tectónica de placas y los procesos de interacción entre la geósfera y los otros subsistemas del planeta Tierra también influyen en la formación y transformación de las rocas, principales constituyentes de la corteza terrestre, lo cual ocurre en tiempo geológico y puede implicar el rompimiento del equilibrio de los diferentes subsistemas del sistema Tierra, bajo diferentes condiciones físico-químicas. En este contexto, los materiales rocosos son continuamente creados y destruidos en una dinámica de transiciones que se ven reflejadas en los tres tipos de rocas que existen en la Tierra: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Para comprender de forma sencilla cómo se relacionan entre sí los diferentes tipos de roca es necesario explicar el ciclo de las rocas. Este ciclo no tiene un principio único, ni las rocas siguen pasos determinados; por tanto, tanto la naturaleza como el aspecto de las rocas dependen de los minerales que las componen y de la evolución geológica de cada región.

Escala del tiempo geológico. Note como las diferentes eras del tiempo geológico (p. ej. Arqueano, Proterozoico, Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico) están asociadas a cambios biológicos. Por ejemplo, el Arqueano está dominado por bacterias, arqueas y algunas procariotas (organismos unicelulares). El Proterozoico observó la aparición de los primeros seres multicelulares (Eucariotas). El Paleozoico observó la expansión de las eucariotas y la aparición de fósiles tanto en los océanos como en la Tierra. El Mesozoico registro la aparición y desaparición de los dinosaurios. En el Cretácico ocurrieron cambios importantes en la ecología global como por ejemplo la aparición de las primeras angioespermas. En el Cenozoico aparecieron los mamíferos, de los cuales hace parte el hombre. Tambien surgieron y expandieron las gramíneas (pastos).
Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

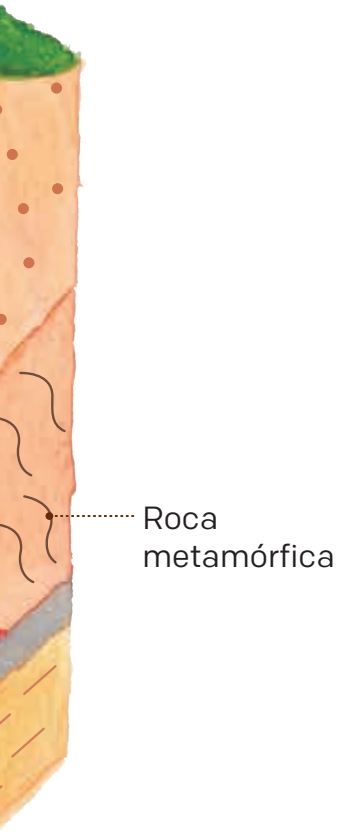

Roca sedimentaria marina
Roca sedimentaria transicional
Roca ígnea volcánica
Depositación
Erosión
Transporte
Corteza oceánica
Manto
Compactación y litificación
Roca sedimentaria continental
Roca ígnea plutónica
Cristalización
Cámara magmática

Supongamos que iniciamos el ciclo de las rocas con el magma. El magma es un líquido caliente y viscoso que puede provenir de dos fuentes: del manto o de rocas preexistentes que se funden a altas temperaturas y presiones en el interior de la Tierra, donde la destrucción de los minerales crea composiciones químicas uniformes.

A medida que el magma entra en contacto con la litósfera, aquel se enfría y se solidifica (cristaliza), a raíz de lo cual sus condiciones físico-químicas cambian. El magma puede ascender rápidamente a la superficie terrestre, cuando es más liviano, y dar paso a una erupción volcánica. La cristalización del magma, o lava en superficie, forma lo que conocemos como *rocas ígneas volcánicas* (p. ej.: riolitas, dacitas, andesitas, basaltos, etc.). Si el magma asciende de forma lenta, atravesando algún cuerpo de roca preexistente (roca caja) y se estaciona en algún lugar profundo de la corteza, se forman las rocas ígneas plutónicas: p. ej.: granitos, granodioritas, dioritas, gabros, etc., que según su forma pueden ser laminares (lacolitos, facolitos o lopolitos) o globosos (*stocks* o batolitos).

Las rocas ígneas pueden verse afectadas por varios procesos. Si la roca ígnea llega a la superficie, entra en contacto con los subsistemas atmósfera, hidrósfera, criósfera y biósfera. Esta interacción resulta inicialmente en un proceso conocido como *meteorización* (física y/o química), que degrada las características originales de la roca y la vuelve vulnerable a la erosión. Como se mostrará más adelante, la meteorización química y física también hacen parte de una serie de procesos que conducen a la formación de los suelos.

La erosión transforma la roca en sedimentos que posteriormente, cuando se depositan, se compactan y se cementan (litifican), dando paso a la formación de las rocas sedimentarias siliciclásticas (conglomerados, areniscas, lutitas, lodolitas). Es importante anotar que existen rocas sedimentarias químicas que son el resultado de la depositación de minerales que cristalizan espontáneamente en aguas tanto continentales como oceánicas (evaporitas y carbonatos), o por la depositación de fragmentos de animales que secretan sus conchas protectoras (corales, plancton). Estos fragmentos, conocidos como *fósiles*, se pueden encontrar tanto en rocas sedimentarias químicas como en rocas siliciclásticas.



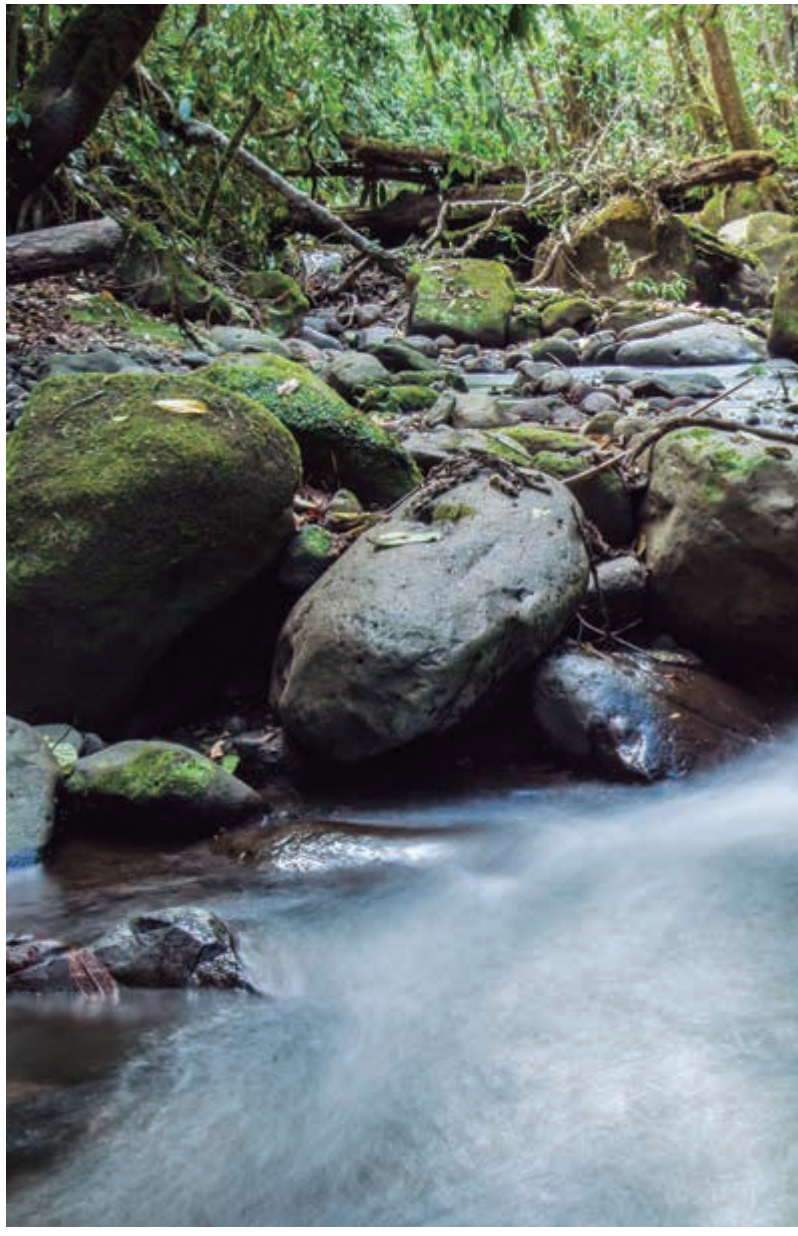
Esquema del ciclo de las rocas. Note como los diferentes subsistemas del planeta tierra interactúan entre sí para generar los diferentes tipos de roca.
Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

Las rocas ígneas y sedimentarias pueden resultar enterradas a gran profundidad, ya sea por la acción de la tectónica de placas o por la sobrecarga de sedimentos acumulados a lo largo del tiempo geológico. Al ser sometidas a grandes presiones y a un calor intenso, las rocas se transforman física, química y mineralógicamente, dando paso a lo que se conoce como *rocas metamórficas* (p. ej.: filitas, esquistos y gneises, entre otras). El enterramiento de las rocas por debajo de la superficie terrestre puede avanzar hasta un punto en que se funden y crean nuevamente un magma, que terminará formando rocas ígneas, y de esta manera se vuelve al punto de partida del ciclo.

A la escala de vida humana, las rocas parecen ser masas invariables; sin embargo, el ciclo de las rocas demuestra lo contrario: los procesos geológicos de creación y destrucción de rocas siempre están operando de manera lenta y gradual. Estos acontecimientos explican los cambios geológicos y biológicos que presenta el sistema Tierra.

Hidrósfera

El término *hidrósfera* hace referencia al agua que existe en el planeta Tierra, tanto en la superficie (océanos, ríos, lagos) como en el subsuelo (aguas subterráneas). La superficie de la Tierra está compuesta de aproximadamente tres cuartas partes de agua. De esta porción, el 97% corresponde al agua salada de los océanos, y el porcentaje restante al agua dulce, tanto superficial como subterránea. La gran cantidad de agua en la superficie terrestre hace de nuestro planeta un lugar ideal para la existencia de seres vivos.



Dada la importancia que tiene el agua para los animales y plantas, una pregunta importante que nos podemos formular es ¿cuál es el origen del agua? Hace unos cinco años, la "cazadora canadiense de aguas primigenias", Barbara Sherwood-Lollar estudió los fluidos que se encuentran atrapados en rocas precámbricas de Canadá y Sudáfrica, que datan de 2600 Ma, a profundidades de entre 1 y 3 kilómetros. Esta investigadora concluyó que los fluidos atrapados en burbujas dentro de los minerales de dichas rocas están compuestos de moléculas de agua. Este es probablemente el descubrimiento de agua líquida más antigua del planeta Tierra. Los resultados de este trabajo sirvieron para que los científicos comenzaran a profundizar en la búsqueda de evidencias científicas de presencia de vida en ambientes extremos y en la posibilidad de la existencia de vida en otros planetas.

Interacción geósfera, hidrósfera y biósfera en las montañas colombianas. Departamento del Cauca. Fotografía de la Federación Nacional de Cafeteros

A pesar de que el agua líquida más antigua de la Tierra hasta ahora encontrada data de 2600 Ma, evidencias indirectas de la existencia de agua en la superficie de la Tierra se han determinado a partir de estudios geoquímicos, la geoquímica estudia la composición química de las rocas. Los circones son minerales de origen ígneo que pueden generarse a partir de la cristalización de magmas que presentan aguas de diferentes orígenes (continentales, marinas, magmáticas). John Valley y su grupo de investigación de la Universidad de Wisconsin, en Madison (Estados Unidos), realizaron estudios geoquímicos minuciosos en circones encontrados en la región de Jack Hills (Australia occidental). Sus estudios demostraron que estos circones, que datan de 4400 Ma, fueron cristalizados a partir de un magma con presencia de materiales de la parte superior de la

corteza terrestre donde existía una hidrósfera activa. Este descubrimiento dio una nueva percepción del enfriamiento de la Tierra y la formación de continentes mucho antes de lo que se creía. Con estas evidencias se refuerza la teoría de la existencia de la hidrósfera en la Tierra antes de los 4300 Ma.

Volvamos al sistema de la Tierra actual, donde el agua en sus diferentes estados (gaseoso, sólido y líquido) circula a través de los océanos, la atmósfera y la geósfera. Al igual que en el ciclo de las rocas, no hay punto de inicio al hablar del ciclo del agua. Sin embargo, dadas las proporciones del agua presente en la superficie terrestre, comenzaremos el ciclo del agua por el océano.

El océano está expuesto a cambios atmosféricos que generan evaporación y condensación de vapor, lo cual crea nubes que luego producen precipitaciones de lluvia, nieve o granizo. Al caer la lluvia en tierra firme, puede permanecer como agua superficial, constituyendo lagos y aguas corrientes que fluyen como quebradas y ríos, y terminar su viaje en el océano, o bien puede infiltrarse a través de los materiales superficiales a zonas de rocas porosas, con lo cual se convierten en aguas subterráneas (acuíferos). En este proceso de infiltración, el suelo absorbe parte del agua que estará disponible para las plantas, que transfieren el agua nuevamente a la atmósfera mediante la evapotranspiración. Así, mantienen en su interior solo una mínima porción de esta, para conservar sus funciones biológicas y metabólicas.

La evaporación y transpiración que se presenta, por ejemplo, en los cultivos, varía según su fase de desarrollo y crecimiento. El proceso de evaporación se presenta con mayor incidencia hacia el inicio del desarrollo del cultivo debido a que las plantas no han alcanzado una cobertura máxima y el suelo por lo regular se encuentra más expuesto a los rayos solares. De esta manera, se puede entender la importancia de la atmósfera en el ciclo del agua, del cual hablaremos más adelante.

Criósfera

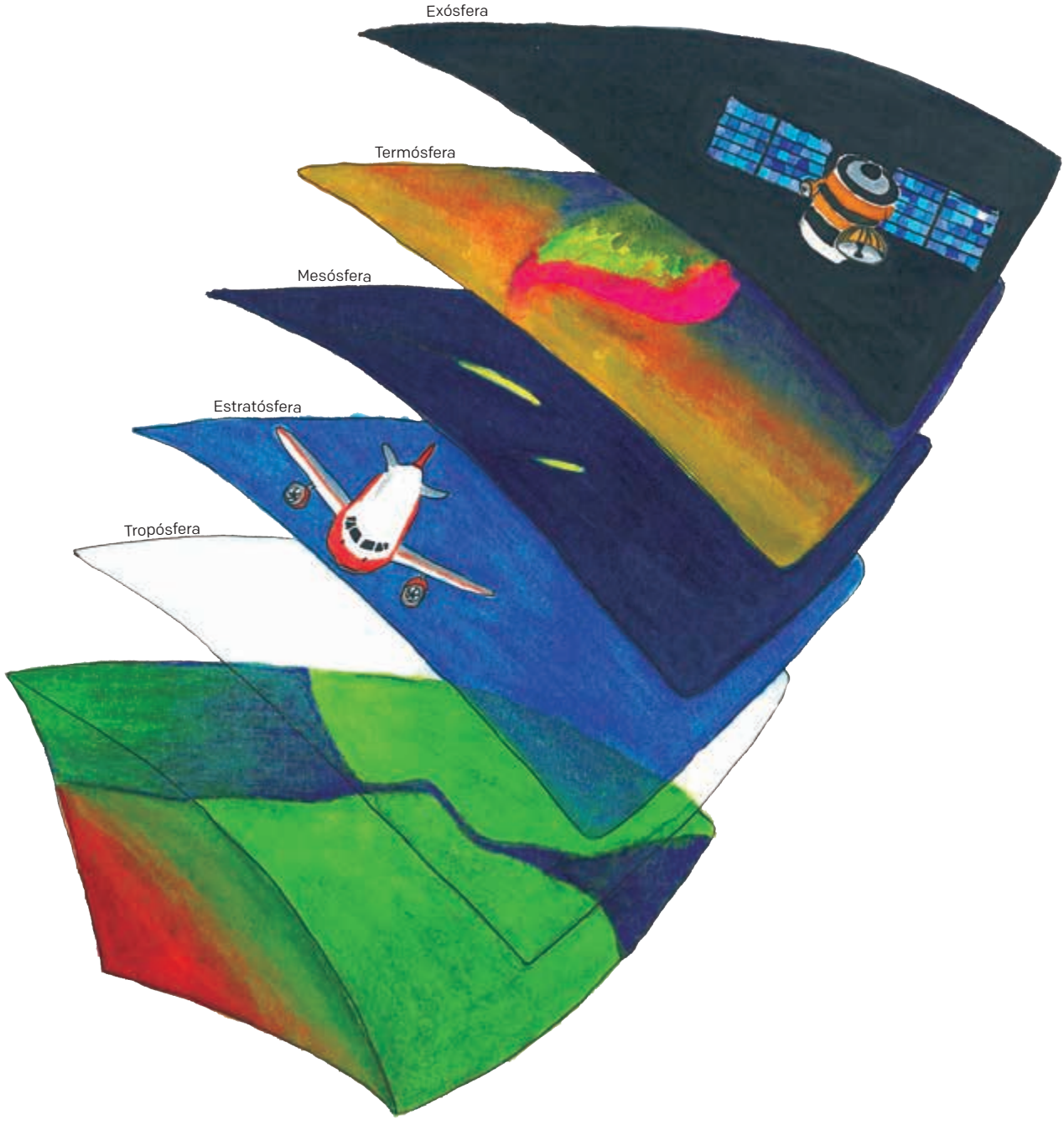
La criósfera está constituida por los elementos del sistema Tierra que contienen agua en estado sólido. Se pueden presentar en forma de nieve, hielo marino, icebergs, placas de hielo, glaciares, bloques de hielo y suelos congelados (*permafrost*) , entre otros. Los periodos de tiempo en los que estos componentes se mantienen en estado sólido, en algunas zonas terrestres, son variados, y su ocurrencia puede estar relacionada con las estaciones del año (nieves estacionales, bloques y capas de hielo) o con la ubicación en el globo terráqueo (glaciares, hielo marino, icebergs, suelos congelados), donde pueden permanecer por millones de años.

En lugares tropicales, como Colombia, la presencia de agua en estado sólido depende principalmente de la variación de temperatura con respecto a la altitud sobre el nivel del mar, aunque factores como las características geográficas y climáticas (precipitación) también influyen en la presencia de agua sólida.

La criósfera tiene una relación directa con la hidrósfera y la atmósfera, que la hace muy sensible a cambios a causa de sus interacciones. En algunas partes de la corteza terrestre, como la Antártida, la nieve y el hielo reflejan el mayor porcentaje de la radiación solar que incide sobre nuestro planeta. Esto hace que la energía que absorbe la superficie terrestre sea menor, de modo que las capas de hielo actúan como reguladoras de la temperatura atmosférica.

El control de la temperatura atmosférica es crucial para la regulación del calentamiento global, que a su vez controla la ocurrencia de los glaciares. Un ejemplo son los glaciares de montaña. Dada su menor área y volumen que los glaciares antárticos, los glaciares de montaña son más vulnerables a los efectos del calentamiento global, que está promoviendo deshielos y una disminución considerable de estas masas.

Formas del agua sólida en nuestro sistema Tierra.
Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza



Esquema de la atmósfera en el sistema Tierra.
Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

Estas evidencias de cambio climático que enfrentamos en la actualidad influyen directamente sobre los ecosistemas en una escala local y sobre las actividades humanas.

Los glaciares y nieves perpetuas colombianos están situados generalmente en las cimas de volcanes. El calentamiento global no solo produce deshielo, sino que no permite que más nieve se acumule sobre estos, y como consecuencia las líneas de nieve se encuentran en constante retroceso. De este modo, los picos nevados colombianos terminarán por desaparecer. Esta desaparición afecta el ciclo hidrológico, especialmente en zonas donde el agua potable, disponible para consumo humano y actividades económicas (p. ej., agroindustriales), se ha visto disminuida.

Atmósfera

La atmósfera está constituida por gases como el nitrógeno (~78%), oxígeno (~21%), argón (0,93%), aunque también contiene vapor de agua en concentraciones variables, dependiendo de la región, desde 0.001%, en zonas frías, hasta 5% en masas de aire caliente y húmedo. El agua se presenta en la atmósfera en forma de vapor, nubes, y algunas veces como pequeños cristales de hielo. La mitad del agua atmosférica se concentra en los dos primeros kilómetros de la tropósfera, que cubre aproximadamente 12 kilómetros desde la superficie terrestre. La tropósfera se encuentra por debajo de la estratósfera, que tiene un espesor de 40 km y contiene la capa de ozono. Por encima de la estratósfera se encuentra la mesósfera (50-80 km), caracterizada por una densidad tal que puede proteger la Tierra de meteoritos; la termósfera (80-700 km), donde las ondas y radiación extraterrestres son reflejadas y donde ocurre la aurora boreal, y la exósfera (700-10000 km) donde orbitan los satélites. No hay un límite específico entre la atmósfera y el espacio exterior; simplemente la densidad de la masa atmosférica va disminuyendo desde la superficie terrestre hasta que los gases se disipan en el espacio.

El balance de energía en la superficie terrestre está influido por el flujo de energía entre el Sol (que es la principal fuente de energía de la Tierra) y la energía interna que emite nuestro planeta. Si este absorbe más energía que la que emite, ocurre un calentamiento, y si absorbe menos, ocurre un enfriamiento. Entender los procesos físico-químicos que actúan en la atmósfera ha sido y será una necesidad para la humanidad, ya que la atmósfera controla de forma eficiente el flujo de energía desde y hacia la Tierra. La temperatura en la superficie del planeta, de hecho, se mantiene debido al efecto invernadero, que es el fenómeno por el cual los gases que componen la atmósfera terrestre retienen parte de la energía que la superficie emite al haber sido afectada por la radiación solar. La temperatura media en la superficie terrestre es de alrededor de 17 grados centígrados. A causa de esta temperatura, el agua se puede encontrar en sus tres fases. Esto permite que la energía se almacene, se transporte y se redistribuya, lo cual da lugar al sistema climático que caracteriza a la Tierra y, por consiguiente, garantiza la existencia de vida.

Biósfera

La biósfera está constituida por los seres vivos, y probablemente es el subsistema que contiene la mayor diversidad de elementos. De esta hacen parte toda clase de organismos, simples y complejos, desde organismos unicelulares (bacterias, protozoos, etc.), hasta organismos multicelulares (plantas, animales, etc.). La vida surgió en los océanos de nuestro planeta hace aproximadamente 3500 Ma. Es precisamente en el océano donde se encuentra la mayoría de la fauna y la flora de la Tierra, desde diminutos organismos unicelulares hasta la ballena azul, catalogada como el mamífero más grande del planeta. La mayor parte de la biota del océano la constituyen unas algas llamadas *fitoplancton*. Estos organismos no solo son la base de la cadena alimenticia marina, sino que también producen, mediante fotosíntesis, aproximadamente la mitad del oxígeno

que los humanos, junto con las demás criaturas terrestres, respiramos. Estudios sugieren que la acción de las bacterias fotosintéticas (cianobacteria) dio paso a los primeros pulsos de oxigenación de los mares y de la atmósfera terrestre hace 3.4 Ma. Los niveles de oxígeno en la atmósfera y los mares permanecieron bajos hasta el inicio de la era Paleozoica, cuando las plantas terrestres que surgieron en el Ordovícico (470 Ma) ayudaron a estabilizar el oxígeno disponible en la atmósfera terrestre, que alcanzó los niveles actuales hace 400 Ma. Este incremento en los niveles de oxígeno en la atmósfera favoreció la aparición y proliferación de los primeros animales y plantas terrestres.

Los organismos que hacemos parte de la biósfera nos vemos involucrados en los cambios que se presenten en cualquiera de los subsistemas del sistema Tierra (hidrósfera, atmósfera, criósfera, geósfera y biósfera). Las grandes masas de agua que rodean los continentes son esenciales para la especie humana. Sin embargo, la pesca excesiva y el calentamiento global amenazan con dejar estas zonas estériles. La intervención humana nos hace vulnerables a los cambios irreversibles en escala de tiempo humano, puesto que aceleran muchos procesos que desembocan en un deterioro de nuestro hábitat, el planeta Tierra. Cuando dos o más de estas esferas interactúan se forma una interfase en el sistema. Un ejemplo es el suelo, que resulta de la confluencia de los subsistemas tratados a lo largo de este capítulo y cuya génesis y propiedades serán explicados a continuación.

Subsistema biósfera, constituido por los seres vivos.
Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

DE LAS ROCAS AL MARAVILLOSO UNIVERSO DE LOS SUELOS

Cuando hablamos del suelo, sabemos que se trata de uno de los recursos naturales más importantes para nosotros, los seres vivos, pero no alcanzamos a imaginar el increíble mundo que se encuentra en esa delgada capa de material no consolidado que envuelve la superficie de la Tierra.

En un contexto general podríamos visualizar los suelos como aquellas zonas que se desarrollan en la interface de la litósfera (rocas), la hidrósfera (agua), la biósfera (organismos) y la atmósfera (oxígeno), es decir, es uno de los subsistemas naturales más complejos y dinámicos de nuestro planeta.

¿Qué es un suelo?

Etimológicamente, la palabra *suelo* deriva del latín "solum" (piso, tierra, territorio), y su definición abarca muchos significados que dependen de la disciplina desde donde se aborde (geología, pedología, edafología, ciencias forestales, agronomía, química, etc.). Sin embargo, quien se encarga de su estudio es la ciencia del suelo (pedología), que lo define así:

El suelo es:

"Un cuerpo natural, independiente, compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que se desarrolla en la superficie de la Tierra como consecuencia de una combinación de procesos determinados en su naturaleza e intensidad por factores como el clima, los organismos vivos, el material parental, el relieve y el tiempo" (SSDS, 2017).

La pedología estudia el suelo como un cuerpo natural y aborda aspectos relacionados con su origen, clasificación y cartografía, mientras que la edafología lo considera el soporte para las plantas y trata temas concernientes a su uso práctico (producción agropecuaria).

¿Cómo se forma un suelo?

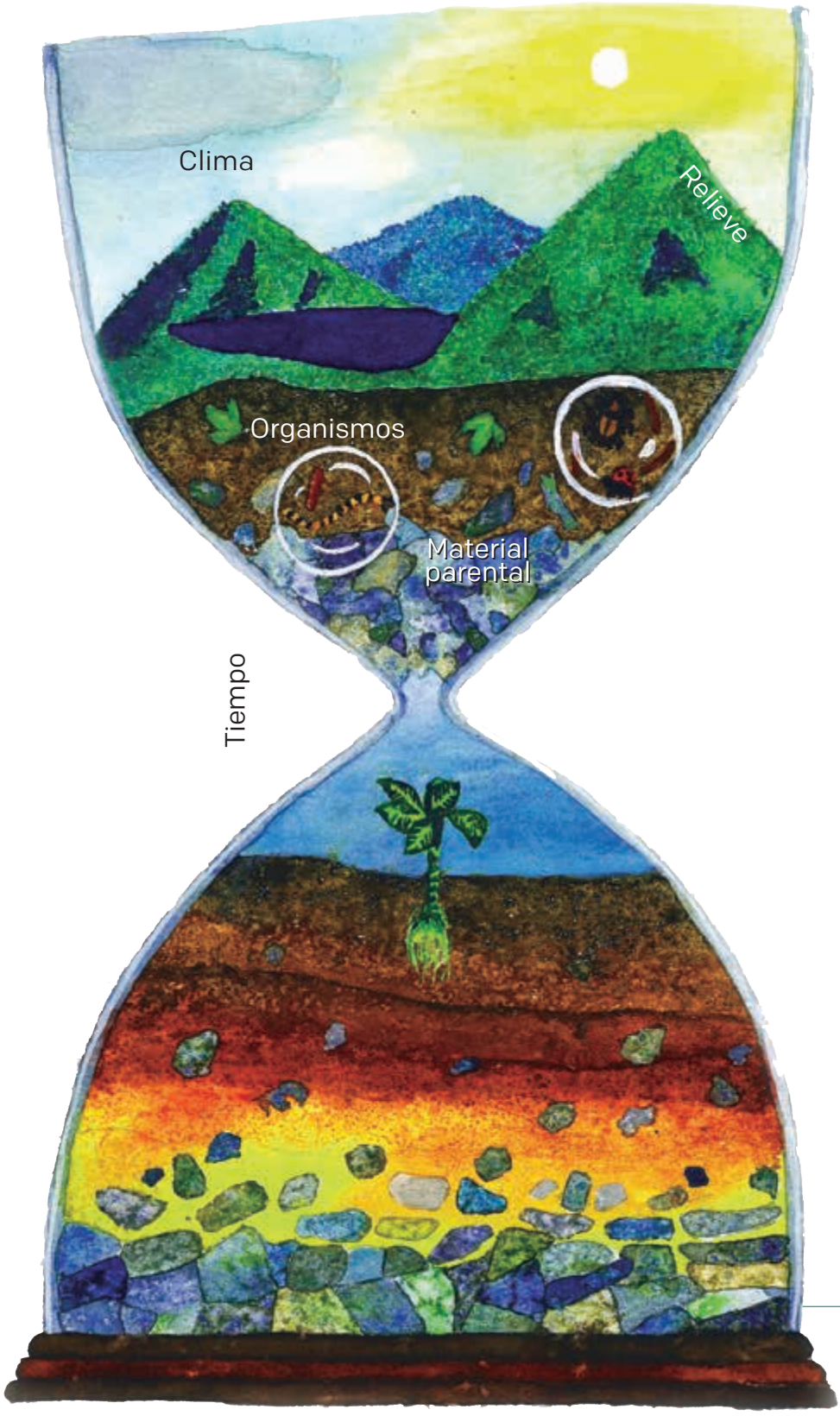
El desarrollo de un suelo es un proceso largo y complejo, y su formación involucra cinco factores indispensables: material parental, relieve, clima, organismos y tiempo.

La historia comienza con la transformación de las rocas en el material parental. Este proceso ocurre cuando las rocas expuestas en la superficie entran en contacto con la atmósfera e hidrósfera (factor climático) y con la biósfera (factor orgánico) y, como producto de esta interacción, se da una serie de cambios físicos, químicos y biológicos que van descomponiendo progresivamente la roca sólida y dura en un material blando, terroso y frágil (saprolito).

Este proceso de desintegración de las rocas en un ambiente netamente superficial se denomina *meteorización*, y puede ser físico, químico o biológico.

Es importante recordar que la meteorización física ocurre cuando las rocas se desintegran para producir fragmentos que conservan la composición química y mineralógica.

Si las transformaciones se dan con la participación de agentes como el agua, el oxígeno y los ácidos orgánicos, la meteorización se denomina *química*, y sus productos finales son *iones*, nuevos minerales generados a partir de los existentes (minerales arcillosos) y minerales residuales resistentes (como el cuarzo). La meteorización biológica involucra la actividad de animales y plantas, que disgregan los materiales y los alteran física y químicamente.

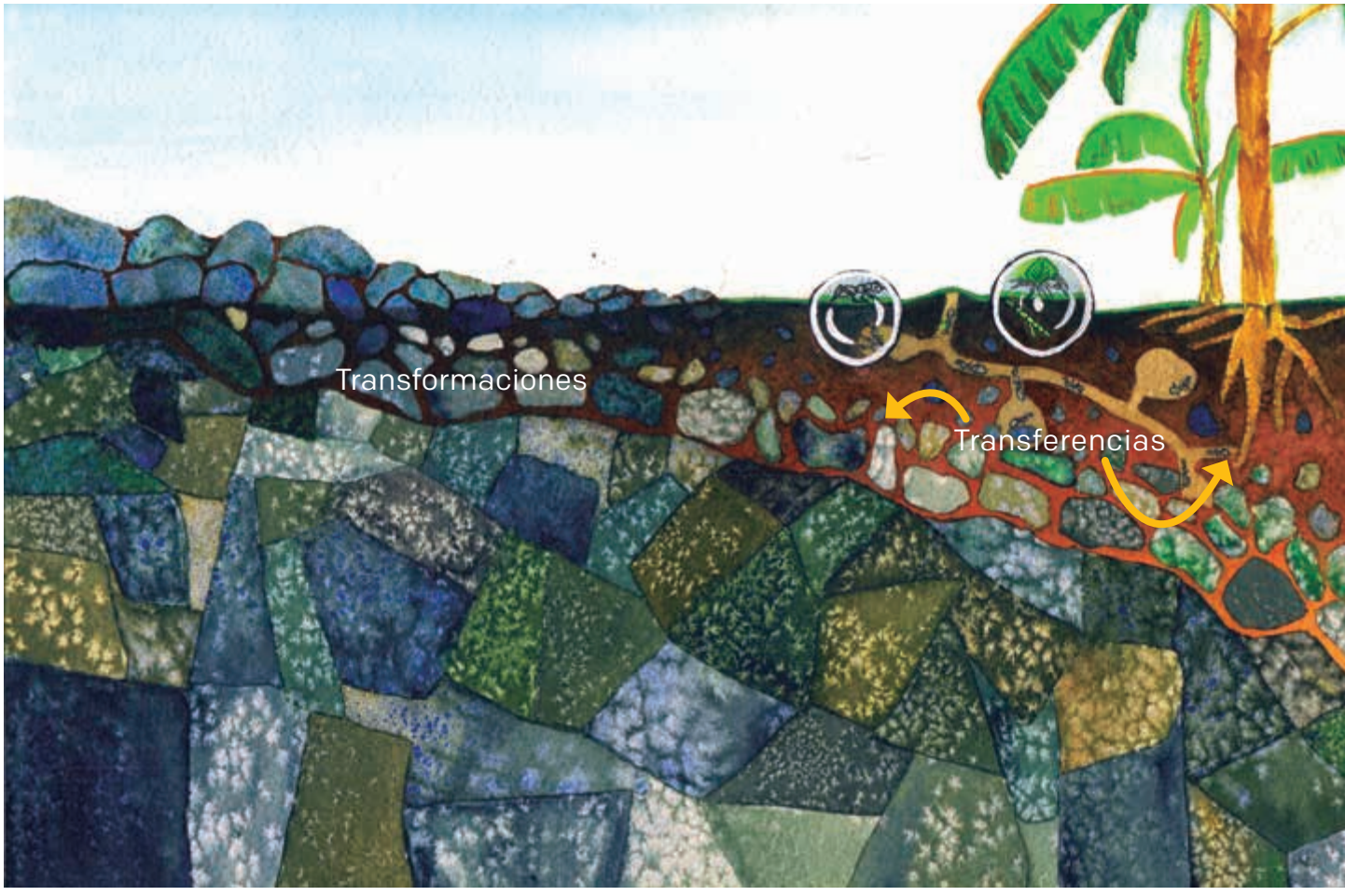


Proceso de desarrollo de un suelo a partir de la interacción de los factores formadores. Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

El material parental a partir del cual evoluciona un suelo está constituido por rocas meteorizadas a las que denominamos *saprolitos* y/o por depósitos no consolidados acumulados en la superficie. Estos depósitos pueden ser de tipo aluvial (terrazas de ríos, avalanchas), gravitacional (cuerpos de antiguos deslizamientos) o piroclásticos (ceniza volcánica), según el agente responsable de la depositación (agua, gravedad, viento, etc.). La suma de todos estos materiales en la superficie se denomina *regolito* (regolito = saprolito + depósitos).

Con el paso del tiempo, este material parental, que en un principio estaba regido por procesos geológicos y que de ellos heredó gran parte de los rasgos que hoy configuran el relieve, sigue el camino de la evolución en función del clima. En un contexto regional, las variables de temperatura y precipitación ayudan a moldear el paisaje, debido a que controlan las velocidades de los procesos de alteración y son responsables del flujo del agua que atraviesa el suelo. El agua y la humedad (factor climático) también influyen en la actividad biológica, pues de estas variables dependen el tipo y la cantidad de organismos presentes.

Siguiendo el curso de la evolución del suelo, los "organismos" comienzan a establecerse en los diversos materiales geológicos donde las condiciones ambientales satisfacen sus necesidades. La colonización ocurre hasta el punto de configurar monumentales ecosistemas y comunidades biológicas que fragmentan, transforman y movilizan materiales en el interior del suelo, y una vez culminan su ciclo de vida, aportan uno de



los componentes esenciales que hacen la gran diferencia entre material parental (saprolito, regolito) y suelo, la materia orgánica.

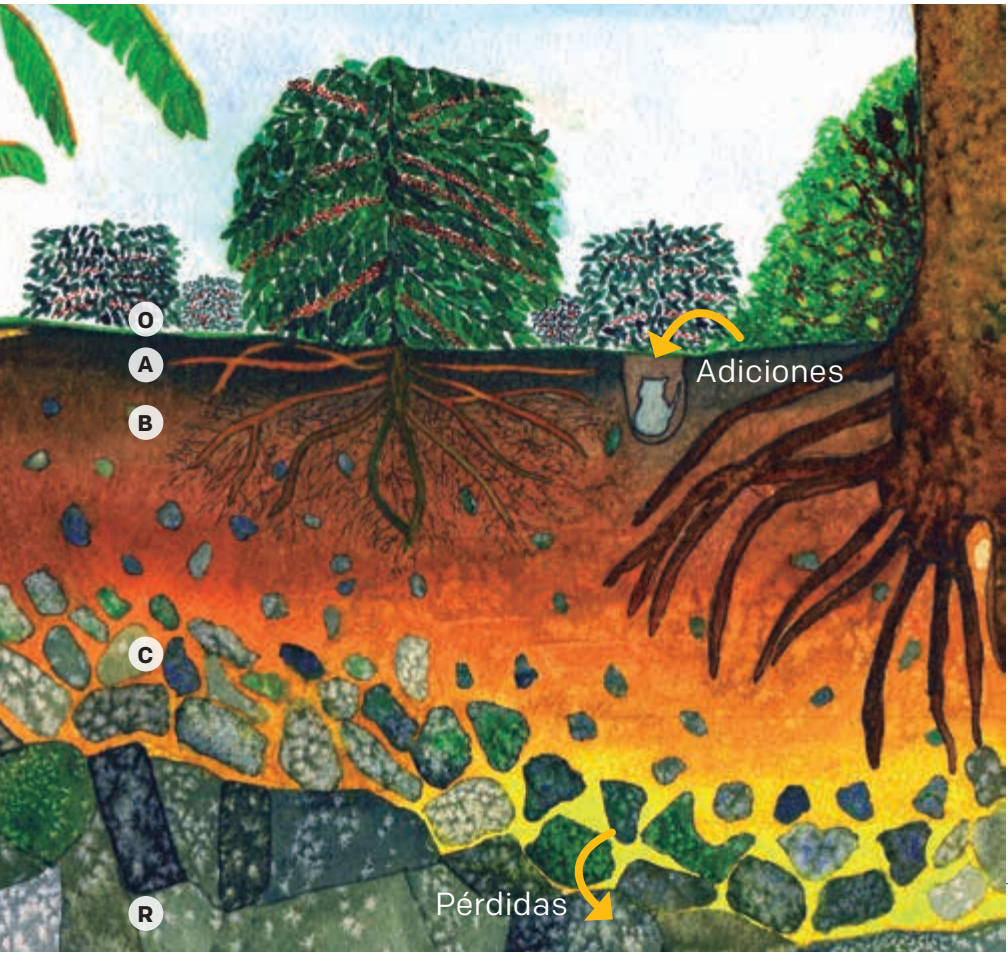
En el sistema Tierra existen miles de combinaciones entre estos factores formadores de suelo, y dependiendo de esas conexiones podemos encontrar miles de universos llamados *suelo*.

Por ejemplo, en una región con altos índices de humedad se incrementa la producción de biomasa y los contenidos de materia orgánica se elevan, pero existe mayor flujo de agua dentro del perfil, con la subsecuente pérdida de elementos químicos. Asimismo, una región con alta temperatura y baja humedad (árido) tiene baja producción de materia orgánica (disminuye la biomasa) y puede ocurrir ascenso de sales debido a la evapotranspiración (evaporación).

El perfil del suelo

Cuando estudiamos un suelo debemos realizar un corte vertical desde la superficie hasta la roca inalterada. Esta sección, denominada *perfil del suelo*, expone muchas características, siendo la más evidente la diferenciación en horizontes. Estos se encuentran más o menos paralelos entre sí y siguen la topografía del terreno. Los horizontes de suelo obedecen a cambios en propiedades de carácter físico, como la estructura (forma como se organizan las partículas), el color (indicador de la composición y de las condiciones climáticas) y la textura (distribución de las partículas en el suelo). Estos horizontes también presentan cambios composicionales (químicos, mineralógicos, biológicos).

El tipo y número de horizontes desarrollados en el curso de la evolución de un suelo dependen



Esquema de formación de un suelo. Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

Desarrollo de los horizontes en un perfil de suelo. Fotografía de Hernán González Osorio, Cenicafé

directamente de los factores formadores y de los procesos que ocurren en su interior. De esta manera, podemos encontrar suelos con mayor o menor presencia de horizontes, según cuáles sean sus condiciones ambientales; sin embargo, podemos ilustrar un perfil de suelo ideal en el cual se exhiben todos los horizontes o capas maestras, que se describen a continuación.

Como vemos, la formación del suelo involucra muchas variables. Se destaca la influencia del material parental, ya que este aporta elementos que finalmente el suelo tiene disponibles y que son aprovechados por las plantas.

Cuando los minerales primarios comienzan el curso de la meteorización, ellos pueden transformarse hasta configurar nuevos minerales, que se denominan *minerales secundarios*. En medio de estas complejas reacciones químicas los suelos liberan iones (cationes y aniones) que quedan en solución en las aguas de los suelos. Estos son justamente los nutrientes que definen la fertilidad del suelo y que son adsorbidos por la planta, según sus necesidades. La disponibilidad de estos nutrientes depende en gran medida de la reacción del suelo, que se establece midiendo su pH.

Con unas simples mediciones podemos saber indirectamente si un suelo tiene o no suficientes nutrientes para las plantas. Cuando tenemos valores de pH bajos, decimos que el suelo es ácido. La acidez del suelo puede deberse a que el material parental es pobre en elementos básicos, o bien, a que el suelo ha estado sometido a intensos procesos de pérdidas (lixiviación), comunes en clima tropical, donde predominan cationes como el aluminio (Al^{+3}) y el hierro (Fe^{+3}). Cuando los valores de pH oscilan entre neutros y levemente altos, la tendencia es básica y por lo regular los suelos presentan concentraciones medias de elementos como sodio (Na^{+}), potasio (K^{+}), magnesio (Mg^{+2}) y calcio (Ca^{+2}), que en términos de fertilidad de suelos, se consideran óptimas.

Estos materiales han perdido totalmente los rasgos de la roca o material parental que les dio origen

Horizonte O: horizonte más superficial, de color oscuro (negro), constituido esencialmente por materiales orgánicos que se encuentran en proceso de descomposición. Su contenido mineral es mínimo o eventualmente ausente.

Horizonte A: horizonte superficial de carácter mineral, pero con influencia de actividad biológica. El material orgánico humificado le aporta coloración oscura.

Horizonte E: horizonte situado bajo el horizonte A, de color claro, caracterizado por presentar pérdidas de materiales finos, como arcillas, minerales y materia orgánica, que migran al horizonte inferior (B).

Horizonte B: horizonte subsuperficial mineral enriquecido por los materiales lixiviados de los horizontes anteriormente descritos, que en nuestro trópico suele presentar coloraciones rojizas debido a la acumulación de hierro.

Horizonte C: horizonte subsuperficial que corresponde a lo que hemos denominado saprolito o material parental de los suelos.

Horizonte R: es el horizonte más profundo y está constituido por las rocas en su estado original (“roca fresca”), es decir, materiales que no han sido afectados por los procesos superficiales.

Procesos pedogenéticos

En cuanto a los procesos relacionados con la pedogénesis (origen), se encuentran unos de carácter general, que son comunes a todos los tipos de suelo, y otros específicos, que son particulares y se rigen según cuál sea el factor predominante en una determinada zona.

Los procesos pedogenéticos generales incluyen adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia.

PROCESOS PEDOGENÉTICOS GENERALES	
Adiciones	Materia orgánica, iones y material particulado
Pérdidas	Erosión y lixiviación
Transferencias	Eluviación (salida material), iluviación (entrada material), calcificación (Ca) y pedoturbación (lombrices)
Transformaciones	Materia orgánica en humus, meteorización física (disgregación de material [partículas]) y meteorización química (minerales primarios en minerales secundarios) (óxidos y arcillas)

Todos estos procesos se reflejan en las propiedades visibles del suelo, y a medida que este evoluciona, las partículas sólidas se van uniendo hasta formar unidades más grandes llamados *peds*, para conformar finalmente la *estructura pedogénica* del suelo. La formación de estructura es la cualidad por excelencia que lo diferencia del material terroso e inerte que ofrece la geología en el perfil de meteorización.

Colombia se encuentra ubicada geográficamente en la esquina nororiental de Sudamérica. Aquí ha ocurrido un sinnúmero de procesos geológicos que a lo largo de millones de años han ido modelando nuestro territorio, hasta lograr la configuración actual. Estos aspectos geográficos permiten unas condiciones ambientales particulares, con presencia de todos los pisos climáticos, innumerables fuentes de agua y diversos ecosistemas, entre los que se encuentran bosques subandinos, andinos, altoandinos, páramos y nevados, que nos confieren el privilegio de ser uno de los países con mayor biodiversidad del planeta.

Siendo este el panorama, podemos visualizar una gran pluralidad de suelos en función de todas las combinaciones posibles de los factores que los forman. Es por ello que en nuestras condiciones tropicales, donde reinan las altas temperaturas y las altas precipitaciones, actúa con mayor intensidad uno de los principales procesos específicos, denominado *oxidación*, encargado de teñir de coloraciones rojizas y ocres nuestras montañas andinas.

Estas condiciones dan lugar a suelos muy evolucionados, con texturas regularmente arenosas y de tendencia ácida, debido a las pérdidas de bases por lixiviación. Ejemplos de estos procesos los observamos en los suelos de la región oriental (Orinoquia y Amazonia).

Otro proceso importante es la andolización, que no es más que el producto de la interacción de las cenizas que emanan de los volcanes cuando hacen erupción con los materiales orgánicos en nuestro clima tropical. Estos suelos son comunes en la región asociada a la cadena volcánica

Ruiz-Tolima, en la cordillera Central, principalmente.

Tipos de suelos

Los suelos como todos los sistemas naturales son susceptibles de ser clasificados. De esto se encarga la taxonomía, quien los organiza en un sistema jerárquico, de acuerdo a su origen y a los factores de formación. Aunque existen varias clasificaciones, en nuestro país se ha adoptado la propuesta por el USDA (United States Department of Agriculture). En las zonas cafeteras colombianas encontramos los siguientes órdenes de suelos:

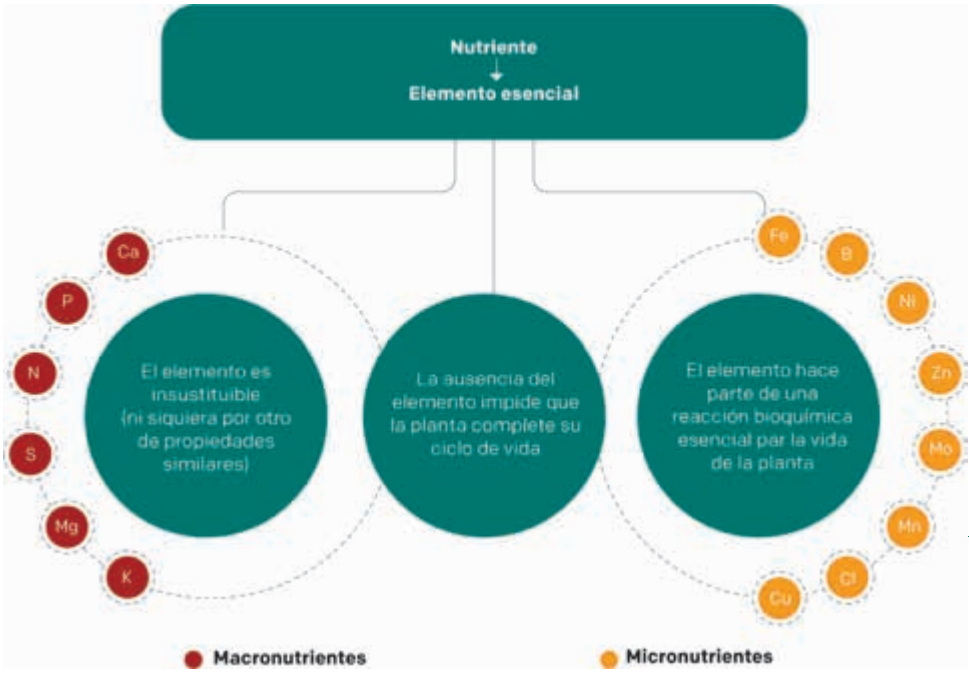
- Alfisoles: son suelos con bajos contenidos de materia orgánica y presentan un horizonte B enriquecido en arcillas provenientes del horizonte A. Requieren un clima con períodos húmedos para translocar las arcillas y períodos secos para su acumulación. Su perfil puede contener la secuencia de horizontes A/B/C o A/E/B/C en un estado más evolucionado.
- Andisoles: son suelos de coloraciones muy oscuras debido a los altos contenidos de materia orgánica que se desarrollan a partir de la meteorización de las cenizas volcánicas. Son suelos bien estructurados y de baja porosidad. La secuencia típica de este orden es A/C o A/B/C.
- Entisoles: son suelos muy jóvenes que no han tenido el tiempo suficiente de evolución y por ello no evidencian horizontes diagnósticos. Normalmente presentan un perfil A/C con bajos contenidos de materia orgánica.
- Inceptisoles: son suelos con poco desarrollo pedogenético, aunque más evolucionados que los Entisoles. Se consideran suelos inmaduros, pobres en materia orgánica y en su formación ningún proceso predomina. Su desarrollo se relaciona con materiales parentales transportados (depósitos aluviales, coluviales,etc) y en el perfil pueden incluir una secuencia A/C en regiones de fuerte pendiente ó A/B/C en regiones geográficas de menor inclinación.
- Molisoles: son suelos que presentan un horizonte A muy oscuro debido a la íntima relación entre la materia orgánica y los minerales del suelo. Evidencian una fuerte actividad biológica y se caracterizan por su buena fertilidad. Presentan generalmente un perfil genéticamente bien evolucionado A/E/B/C.
- Vertisoles: son suelos que se forman a partir de arcillas expansivas denominadas esmectitas (materiales sedimentarios muy finos) En períodos húmedos estas arcillas se hidratan y expanden, mientras que en periodos secos se contraen. Esta actividad termina formando grietas en la superficie de estos suelos, por lo cual heredan muchas limitaciones físicas para las prácticas agrícolas.

Nutrientes de los suelos cafeteros colombianos

Cuando se analiza químicamente la composición elemental de las plantas superiores es posible hallar un número considerable de elementos; sin embargo, ello no significa que todos sean esenciales para la nutrición vegetal. Esto se debe a que las raíces de las plantas absorben de manera indiscriminada cualquier elemento que se encuentre disponible. Debido a esto, se deben separar aquellos elementos que son esenciales para el crecimiento y el desarrollo de las plantas.

Todas las plantas, incluyendo el café, necesitan de agua y de diferentes moléculas orgánicas para su supervivencia; por lo tanto, los elementos que componen el agua (H_2O) y cualquier molécula orgánica formada a partir de carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H) son imprescindibles para su crecimiento y desarrollo. Estos elementos son tomados del agua que absorben las raíces y del dióxido de carbono (CO_2) que toman las plantas, o vía fotosíntesis.

Junto con el C, H y O, otros catorce elementos son requeridos para las funciones fisiológicas de las plantas, los cuales se absorben desde el suelo, razón por la cual se clasifican como minerales.



Nutrientes y elementos necesarios para las funciones fisiológicas de las plantas

Seis de ellos tienen una demanda más alta y se denominan *macronutrientes*; la concentración de estos elementos en el tejido vegetal se mide, de modo general, en gramos por kilogramo de materia seca, y se expresa en términos de porcentaje. Los ocho restantes son exigidos en cantidades menores y se los denomina *micronutrientes*; su concentración se mide en miligramos por kilogramo, o en partes por millón (ppm).

La cantidad de nutrientes que absorben las plantas de café desde el suelo se puede ver afectada por las características del cultivo (especie/variedad), las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, las condiciones del clima (principalmente lluvia, temperatura, brillo solar, horas luz y vientos) y el manejo de los sistemas productivos. Las variedades presentes en las diferentes regiones de Colombia son resistentes a la roya y, por lo tanto, no pierden su vigor ante la presencia de la enfermedad, resultado que se ve reflejado en el crecimiento de la parte aérea y las raíces, lo cual mejora la toma de los nutrientes.

En cuanto a los suelos, los derivados de cenizas volcánicas (andisoles) presentan un mayor contenido de materia orgánica, componente que constituye la principal fuente de nitrógeno, azufre y algunos micronutrientes para las plantas, y que además mejora las condiciones de aireación y retención de agua en el suelo. Sin embargo, en estos suelos la disponibilidad de fósforo es menor debido a la naturaleza de las arcillas que fijan (atrapan) el elemento. Por otro lado, en suelos con poca capacidad para retener agua (suelos arenosos y pobres en materia orgánica), particularmente aquellos que se localizan en regiones muy secas, es recomendable el establecimiento de árboles para brindar sombra al café. Regímenes de lluvia cercanos a los 2500 mm/año, y con buena distribución a lo largo del año, son los que más favorecen la nutrición de los cafetales. Cuando ocurre una baja precipitación (menor de 1500 mm/año) la absorción de los elementos requeridos se ve afectada, situación que perjudica el crecimiento de la planta y el llenado de los frutos. El exceso de lluvia aumenta la pérdida de los nutrientes por lixiviación o lavado. En lo que respecta al manejo, tienen particular relevancia las prácticas de conservación del suelo, la fertilización

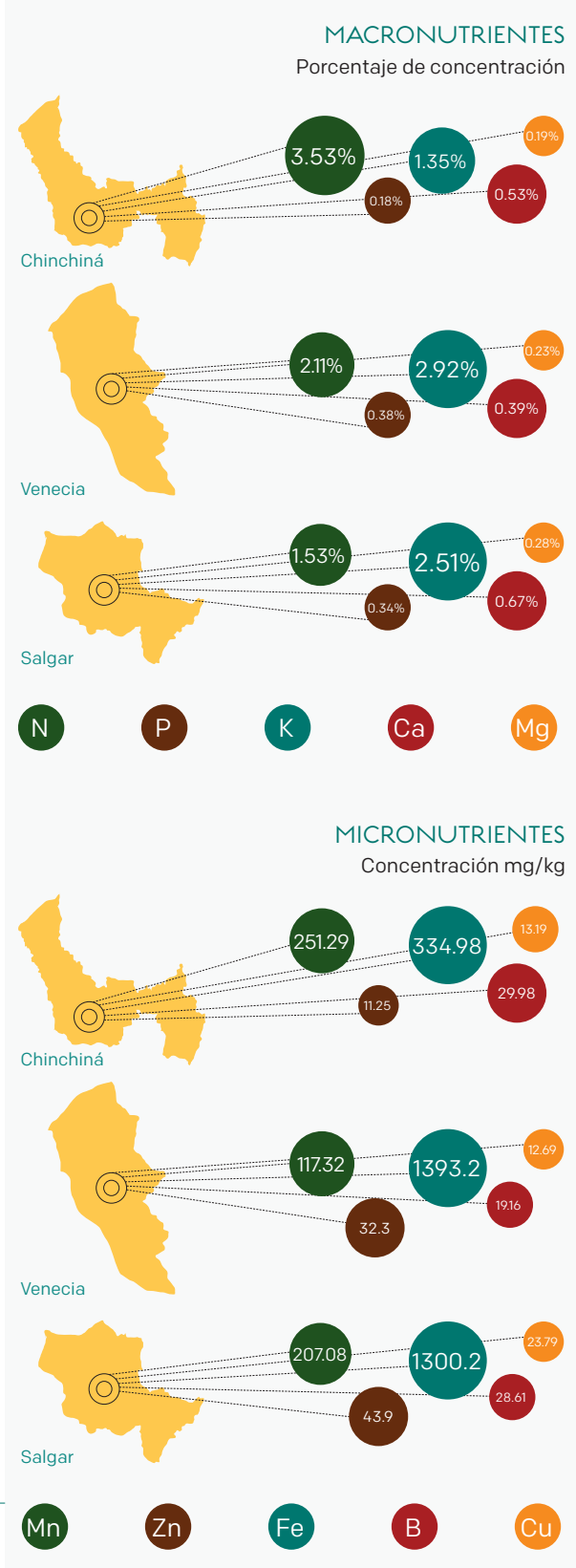
y el control de la acidez, la siembra en épocas adecuadas, el control de malezas (arvenses), el control de plagas y enfermedades, el establecimiento de plantaciones con densidades adecuadas y la regulación de la sombra.

En los cultivos cafeteros, la cantidad de los elementos esenciales varía durante las diferentes etapas del cultivo. A continuación se presenta información obtenida para las condiciones de Colombia. En general, durante todas las fases del cultivo los dos macronutrientes predominantes en la planta son el nitrógeno y el potasio, seguidos, generalmente, por calcio, fósforo, magnesio y azufre. En cuanto a los micronutrientes, predomina el hierro y manganeso, seguido por zinc, cobre y boro.

Etapa de almácigo

Una vez que la plántula de café, o "chapola", alcanza el tamaño óptimo en el germinador (aproximadamente dos meses después de iniciar el proceso de la germinación de la semilla), se trasplanta a una bolsa plástica con solo suelo o mezclado con abonos orgánicos, lugar en el que permanecerá entre cuatro y seis meses, según el tamaño de la bolsa, la fertilidad del sustrato y las condiciones climáticas predominantes (humedad, temperatura y luz, principalmente).

Los valores de la concentración de nutrientes en plantas de café durante la etapa de almácigo, es variable. Esto se observa en tres unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera de Colombia: departamentos de Caldas (Chinchiná) y Antioquia (Venecia y Salgar). En estas zonas se aprecian cambios en la cantidad de nutrientes asociados a diferencias de tipo de suelo. Por ejemplo, los bajos contenidos de fósforo y potasio en los suelos de la unidad Chinchiná (un andisol) se traducen en una menor absorción, y los altos niveles de materia orgánica se reflejan en la concentración de nitrógeno.

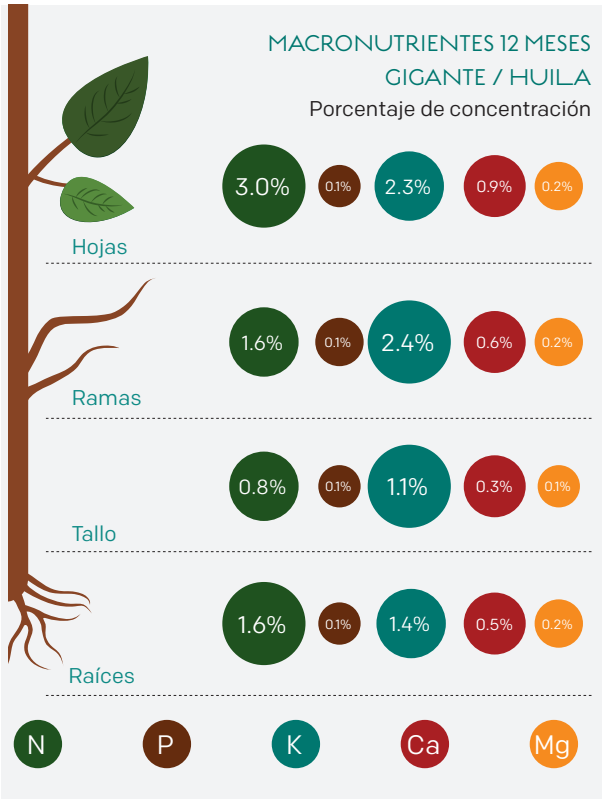


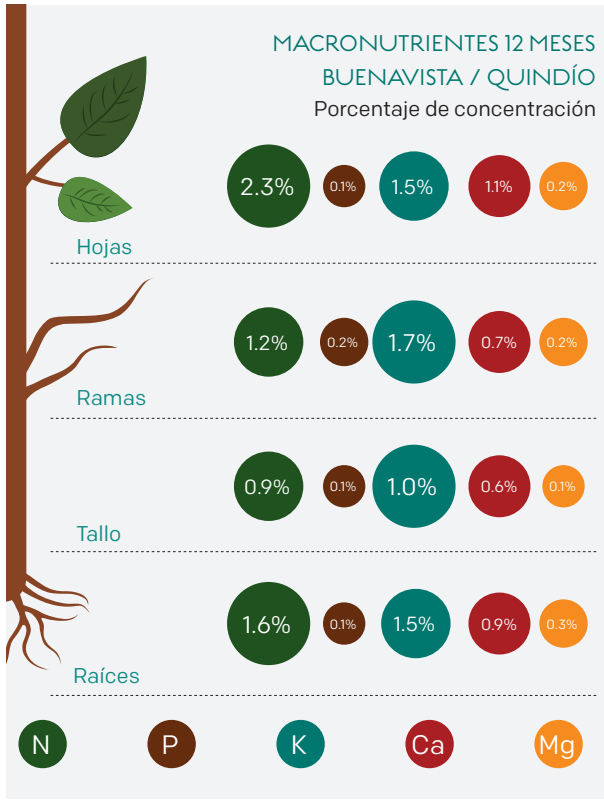
Concentración de nutrientes en café durante la etapa de almácigo en tres unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia
Fuente: Cenicafé

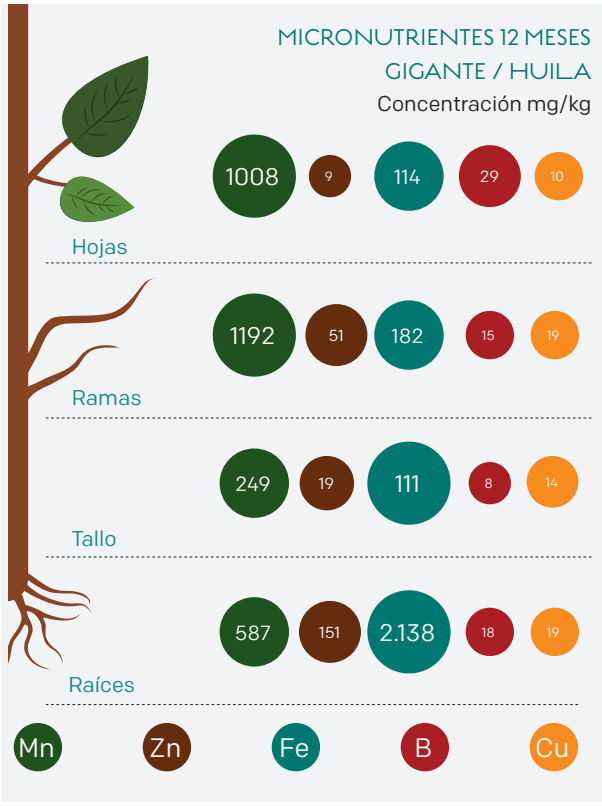
Planta de café durante la etapa de establecimiento del colino. Fotografía de Cenicafé

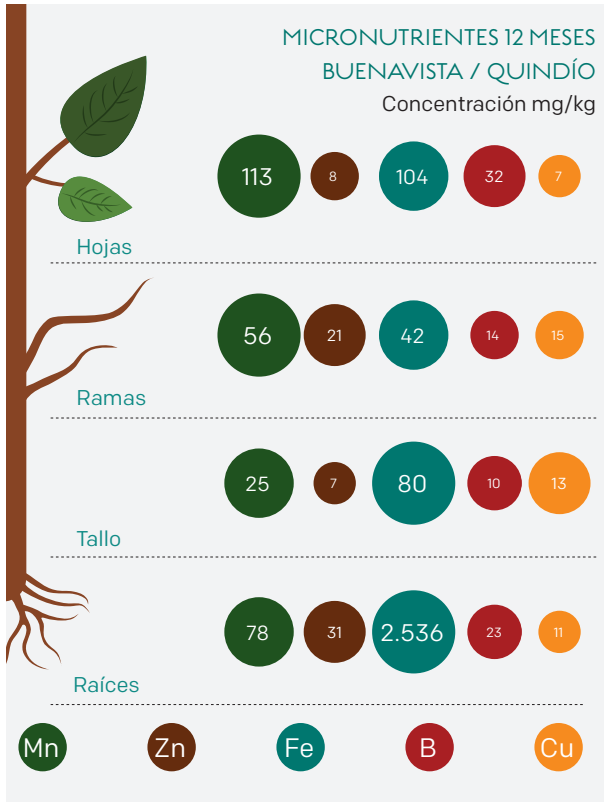
Etapa de establecimiento

Durante esta fase, que va desde la siembra del colino en el campo hasta un año después, aproximadamente, la planta de café presenta un crecimiento lento y, debido a ello, extrae del suelo cantidades relativamente bajas de nutrientes, según las condiciones del sitio y el manejo. Por ejemplo, las plantas de dos localidades de la zona cafetera del país (Huila y Quindío), que presentan contrastes en suelos y clima, muestran concentraciones de macro y micronutrientes muy diferentes. Mientras que las concentraciones de manganeso en Quindío son bajas en todos los órganos de la planta, en Huila ocurre lo contrario, respuesta que se relaciona con la fertilidad natural del suelo.

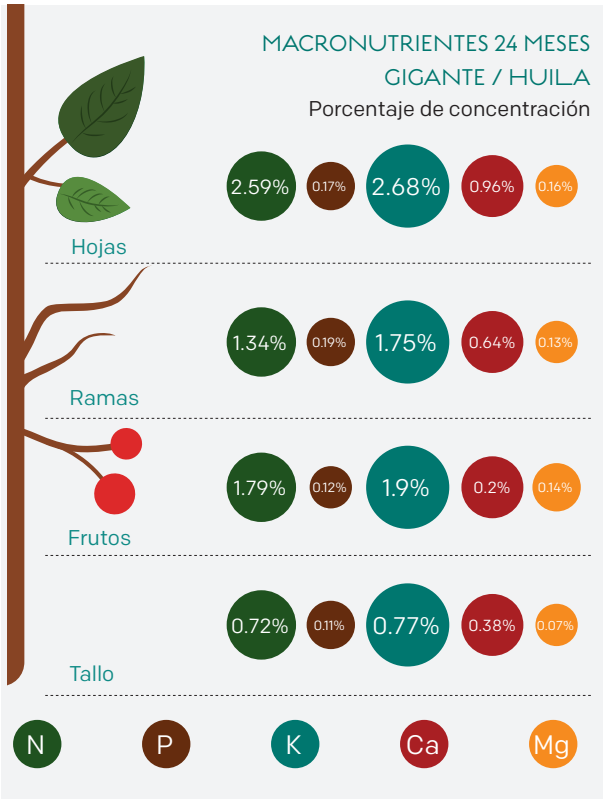


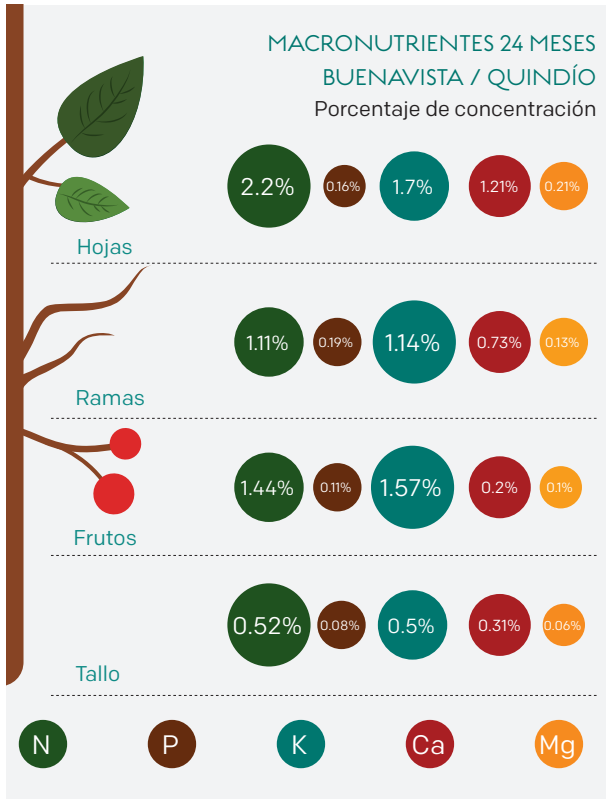


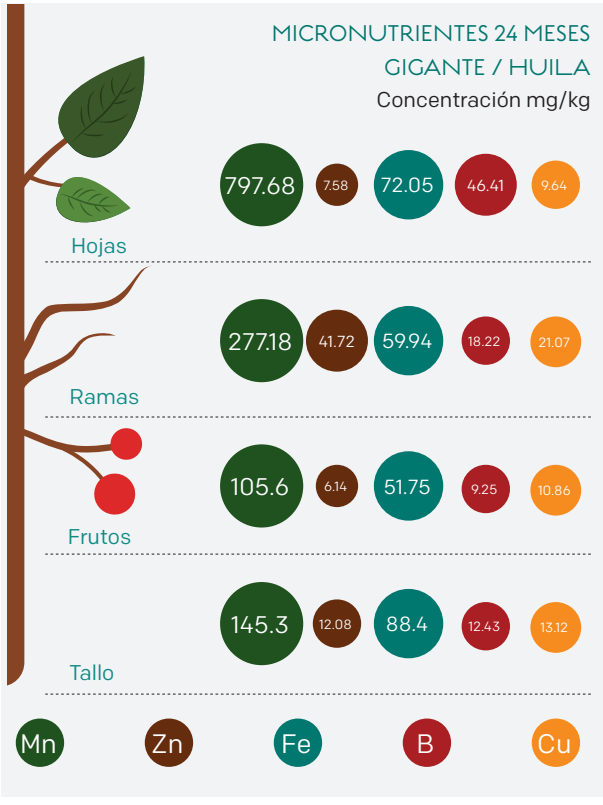


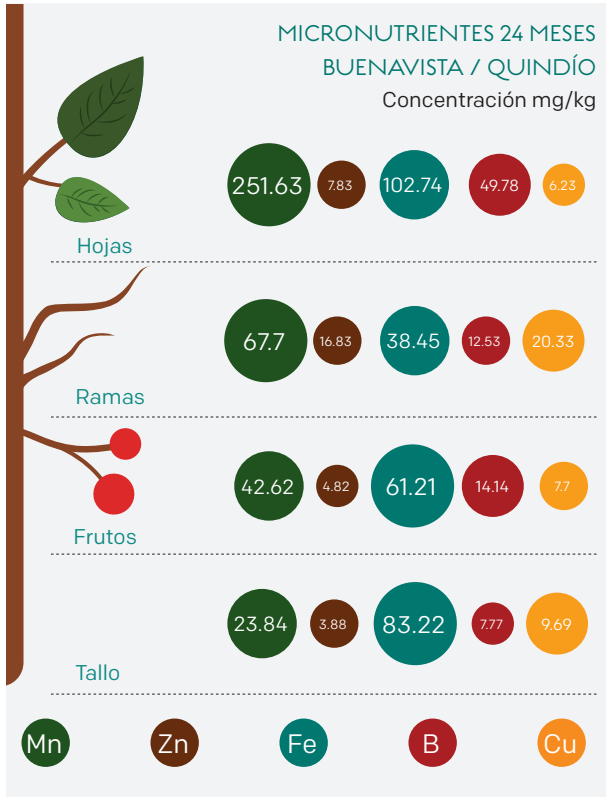


Concentración de nutrientes en café según cada órgano de la planta, a los 12 meses de edad, en los municipios de Gigante (Huila) y Buenavista (Quindío).
Fuente: Cenicafé









Concentración de nutrientes en café, según cada órgano de la planta, a los 24 meses de edad, en los municipios de Gigante (Huila) y Buenavista (Quindío).
Fuente: Cenicafé

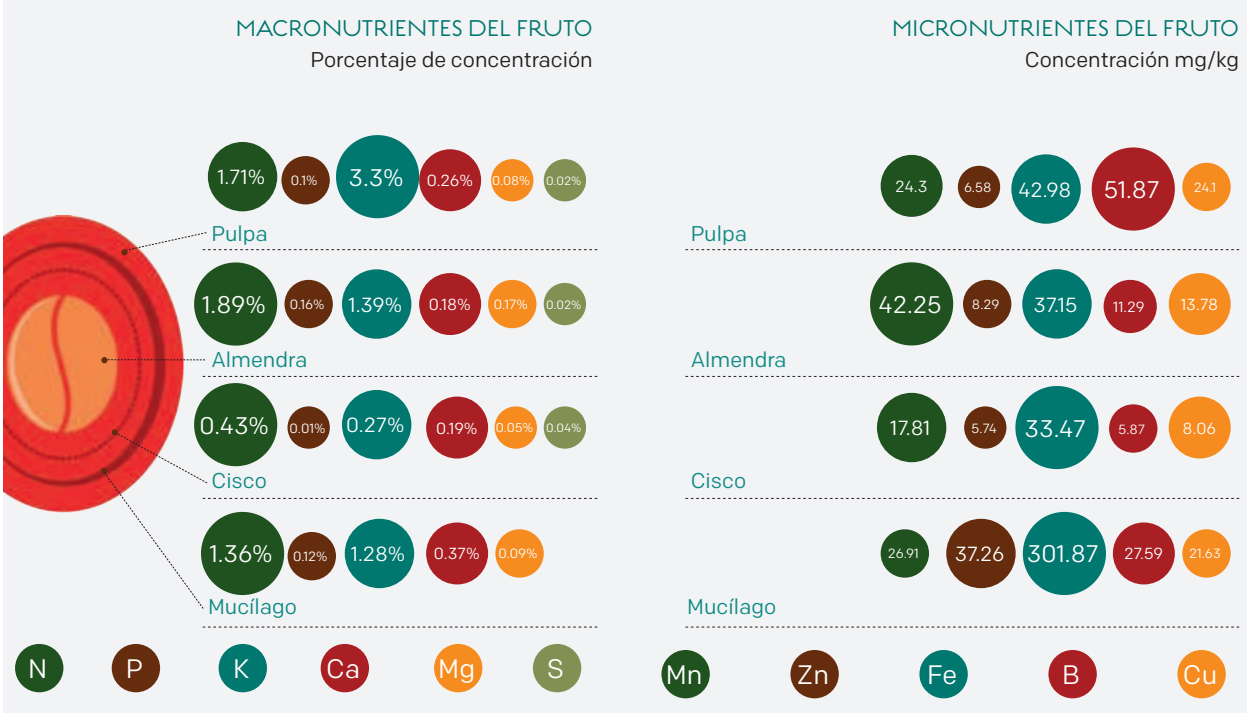
Etapa de producción

Al iniciar la fase reproductiva, es decir, entre los 18 y 24 meses después del trasplante en el campo, la planta de café crece con un ritmo más rápido y absorbe una mayor cantidad de nutrientes. En esta etapa, una gran parte de los nutrientes se acumula en los frutos, proceso que a su vez depende del desarrollo de los demás órganos de la planta, que también demandan los elementos requeridos.

Las diferentes partes que componen el fruto del café difieren en su composición elemental. Por ejemplo, mientras en la almendra predomina el nitrógeno, en la pulpa es el potasio el nutriente imperante.

Con respecto a la almendra, cuyos compuestos determinan en buena medida la calidad física y organoléptica del café, se pueden presentar diferencias entre las producidas en diferentes regiones, de acuerdo con la riqueza natural del suelo y las prácticas culturales, principalmente la fertilización. Como ejemplo se puede observar en la tabla la composición de algunas muestras.

Planta de café durante la etapa de fructificación. Fotografía de la Federación Nacional de Cafeteros



Composición elemental de las diferentes partes que componen el fruto de café.
Fuente: Cenicafé

Composición elemental de la almendra en diferentes regiones de Colombia

DEPARTAMENTO	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	(%)						(mg/kg)				
Antioquia	1.76	0.13	1.37	0.20	0.18	0.10	37.54	47.33	8.00	13.38	11.00
Caldas	2.04	0.18	1.38	0.31	0.19	0.12	42.39	47.64	9.75	15.85	16.58
Cauca	1.85	0.16	1.44	0.09	0.17	SD	32.11	33.32	6.21	15.32	7.89
Cesar	1.66	0.10	1.53	0.11	0.13	SD	21.42	28.50	7.17	11.25	12.25
Cundinamarca	1.80	0.16	1.27	0.12	0.15	SD	34.31	23.00	7.25	11.81	11.31
Huila	1.86	0.16	1.37	0.08	0.15	SD	28.27	121.05	8.00	12.73	6.82
Magdalena	1.84	0.15	1.00	0.11	0.11	SD	26.00	22.25	6.75	6.25	10.75
Nariño	1.86	0.17	1.46	0.10	0.16	SD	45.50	49.25	8.92	12.42	7.00
N. de Santander	1.87	0.17	1.43	0.11	0.16	SD	29.15	31.42	9.35	15.85	9.54
Quindío	1.84	0.13	1.44	0.14	0.16	0.10	34.46	36.65	7.08	12.19	10.58
Risaralda	1.86	0.15	1.51	0.14	0.16	0.10	35.34	33.56	7.60	14.31	8.47
Santander	1.93	0.16	1.28	0.09	0.14	SD	38.30	30.90	7.00	9.90	8.70
Tolima	1.83	0.14	1.35	0.15	0.16	0.13	41.76	27.80	7.78	13.02	9.06
Valle del Cauca	1.78	0.13	1.27	0.10	0.14	SD	35.46	31.19	7.73	10.46	8.19

SD: sin datos

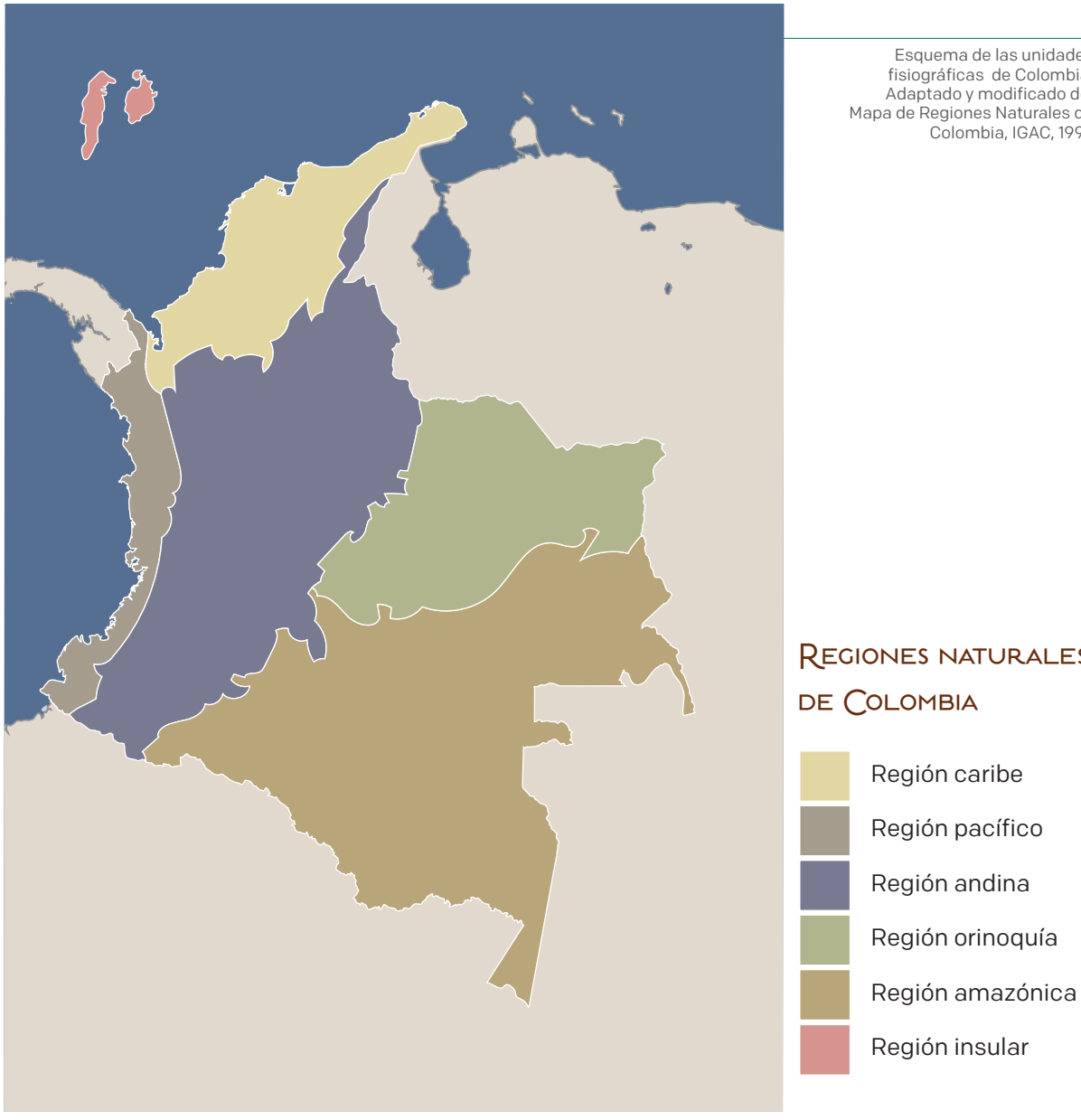
Fuente: Cenicafé

HACIENDO COLOMBIA: UNA HISTORIA GEOLÓGICA

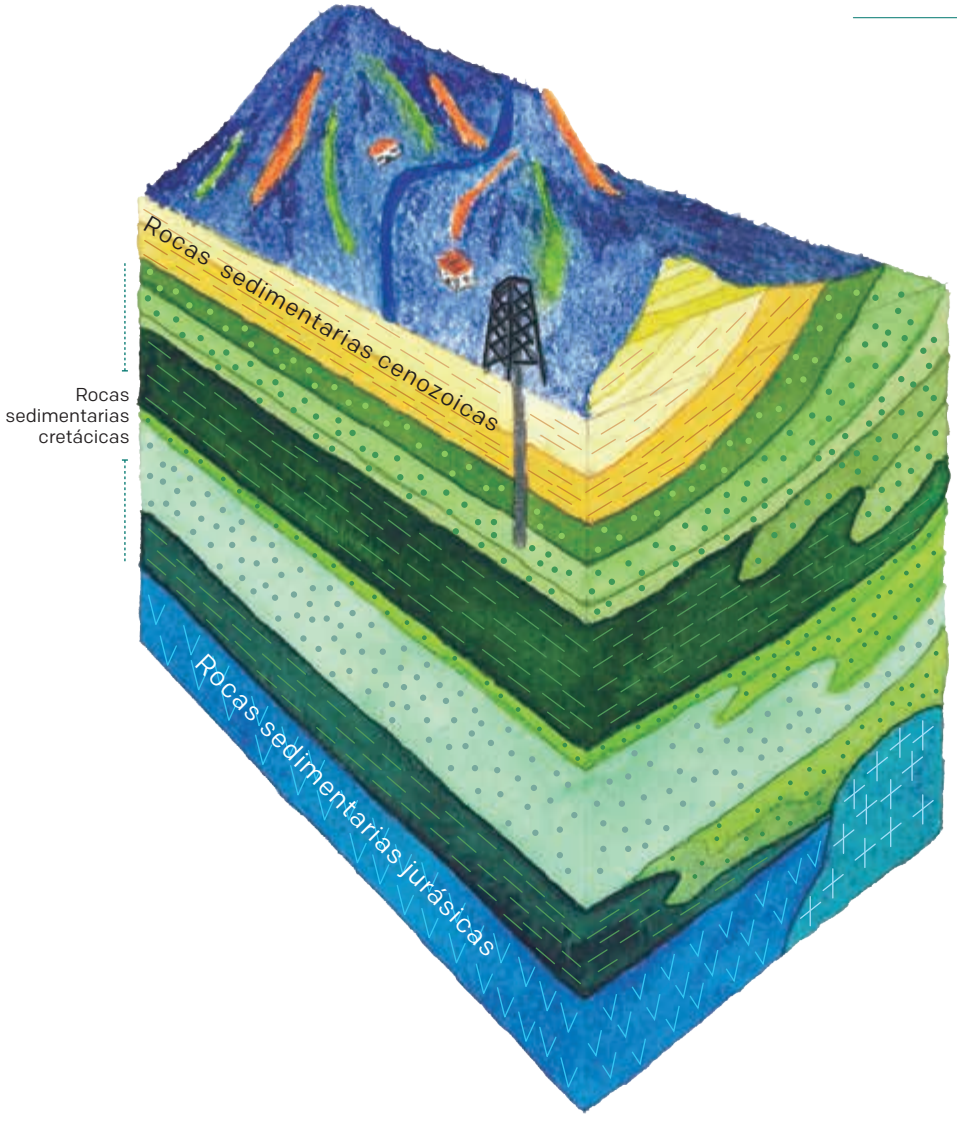
Generalidades de la geología colombiana

El territorio colombiano tiene áreas continentales y oceánicas. La parte continental comprende, en el oriente, las planicies de los ríos Orinoco y Amazonas; en el centro, la cadena montañosa andina; en el occidente, las zonas costeras del océano Pacífico; en el norte, las llanuras del río Magdalena y las zonas costeras de mar Caribe, y en el sur, la extensión de los Andes colombianos. Las zonas oceánicas corresponden al mar Caribe y al océano Pacífico, que presentan varias zonas insulares (p. ej.: el Archipiélago de San Andrés y Providencia y las islas de Malpelo y Gorgona).

Una de las características fisiográficas más importantes de la geografía colombiana es la presencia de tres cordilleras, que constituyen la



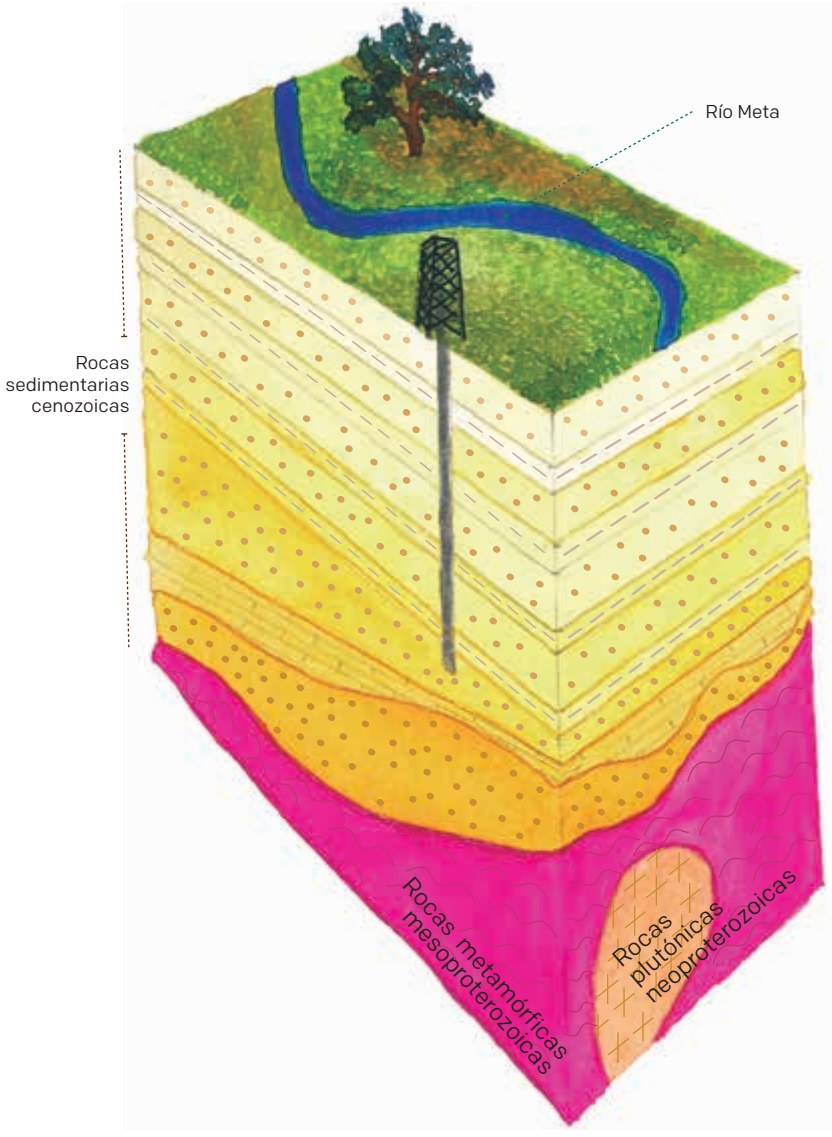
Esquema de las unidades fisiográficas de Colombia. Adaptado y modificado del Mapa de Regiones Naturales de Colombia, IGAC, 1997



Columna estratigráfica de la cordillera Oriental. Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

parte más norte de la cadena montañosa andina. Estas cordilleras (Oriental, Central y Occidental) atraviesan el territorio colombiano de norte a sur y están separadas por los valles de los ríos Magdalena y Cauca. La cadena montañosa andina está limitada por las planicies de los ríos Orinoco y Amazonas, en el Oriente, por el valle inferior del Magdalena en el norte, y las áreas litorales de la región pacífica en el occidente. Además de estas cordilleras, el territorio colombiano presenta varios sistemas de serranías separadas de la cadena andina, que se encuentran en la parte norte de Colombia (p. ej.: Sierra Nevada de Santa Marta, serranía del Perijá y serranías de la Guajira; Cocinas, Macuira y Jarará).

Los accidentes geográficos arriba mencionados se pueden explicar a partir de la evolución geológica del territorio colombiano. La parte más oriental de Colombia incluye el registro geológico de los ríos Orinoco y Amazonas, además de rocas sedimentarias de la era Cenozoica (más jóvenes que 37 Ma). Estas rocas se sedimentaron sobre



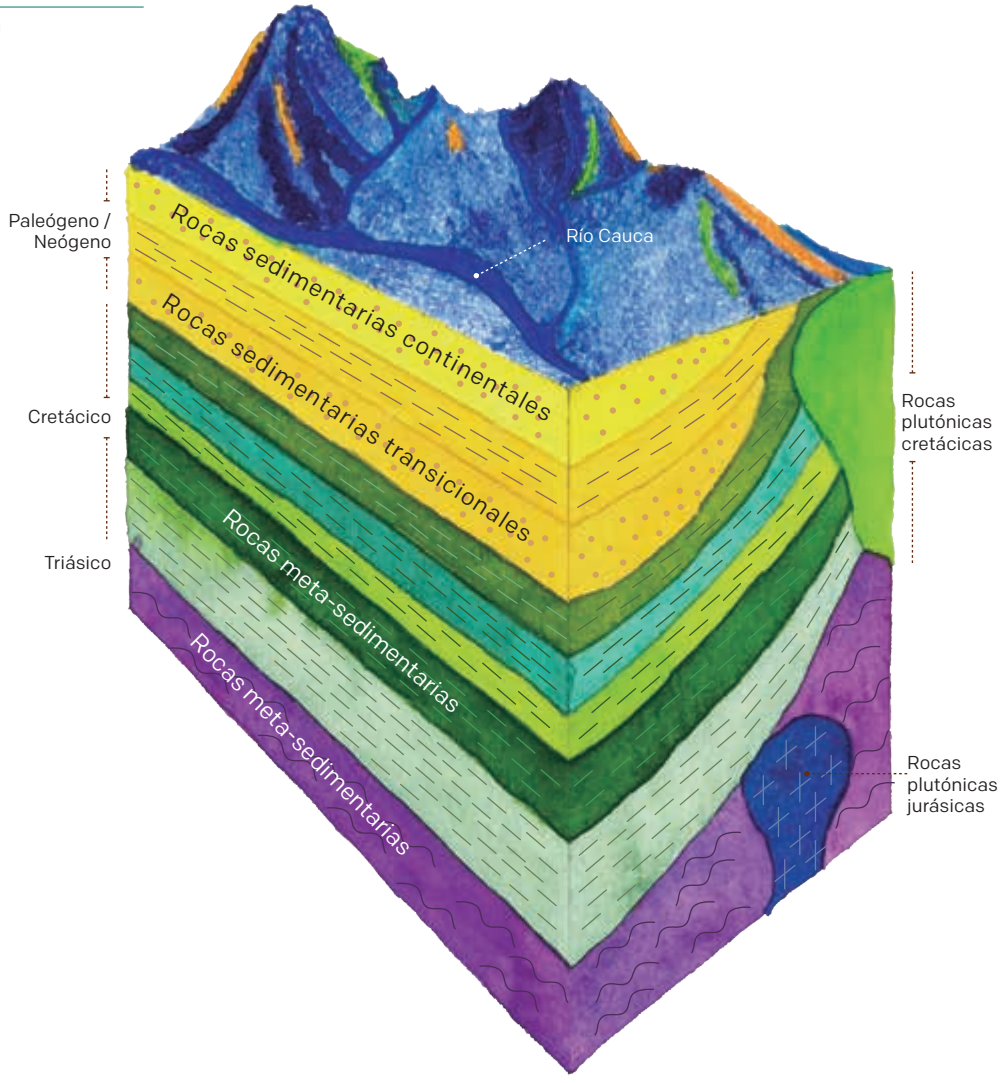
Columna estratigráfica de los llanos orientales. Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

una gran parte de las rocas ígneas y metamórficas de la edad Precámbrica (541 Ma más antiguas), que constituyen las rocas más antiguas de nuestro territorio. Estas rocas pertenecen al Escudo de la Guyana, que se extiende hacia el sur y el oriente del continente, y cubre parte de los territorios de Perú, Venezuela, Brasil y las Guayanas.

Las planicies de los ríos Orinoco y Amazonas se encuentran limitadas al occidente por la cordillera Oriental, que en su mayor parte está constituida por rocas y depósitos sedimentarios, tanto de origen marino como continental, que datan desde el inicio de la era Paleozoica (hace 541 Ma) hasta el presente.

Estas rocas son similares a las que se encuentran en la serranía del Perijá y en la cordillera de Mérida, en Venezuela, pues son extensiones situadas más al norte de la cordillera Oriental colombiana.

Columna estratigráfica de la cordillera Central. Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza



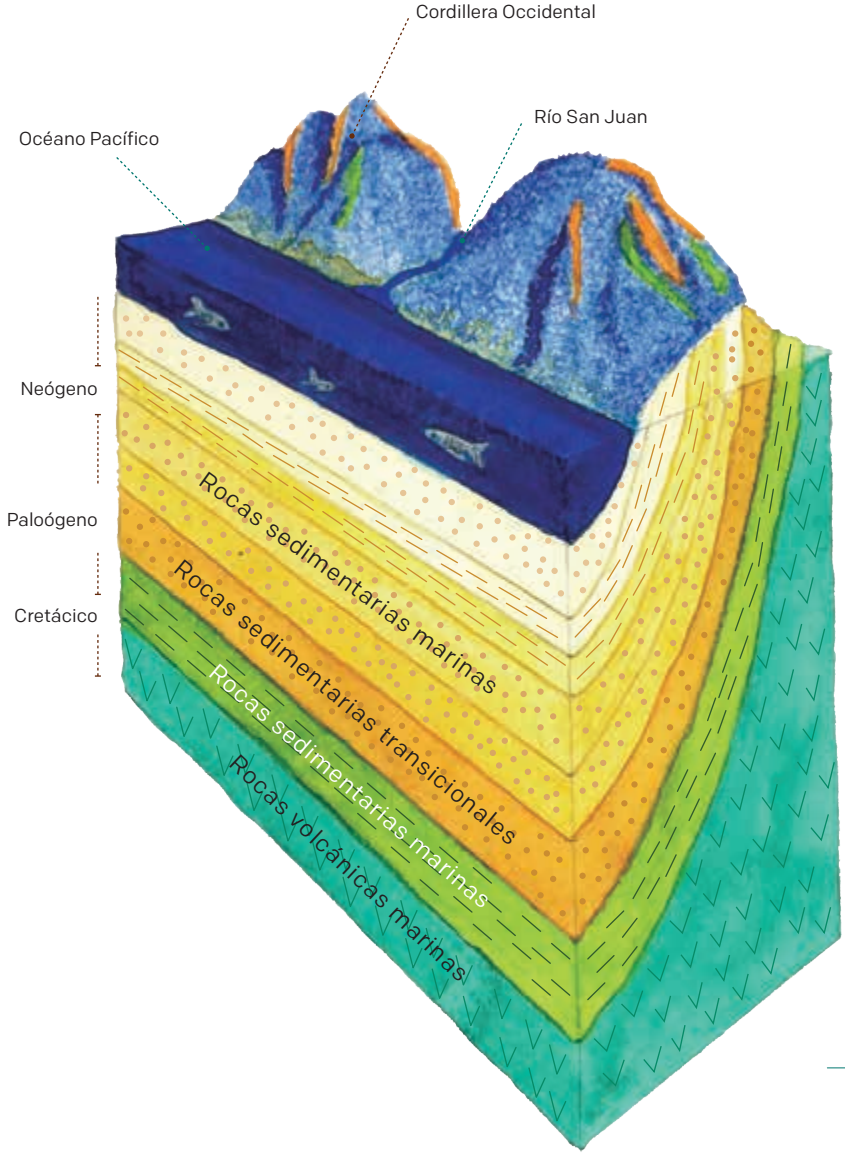
Rocas ígneas y metamórficas de la era Precámbrica también se encuentran en algunos sectores de la cordillera Oriental, en los departamentos de Santander, Meta, Caquetá y Huila.

La cordillera Oriental colombiana está separada de la cordillera Central por el valle del río Magdalena, la arteria fluvial más importante de Colombia. Los depósitos sedimentarios recientes del Río Magdalena cubren gran parte del registro sedimentario (Jurásico – Cenozoico) de la cordillera Oriental, que se extiende en sub-superficie.

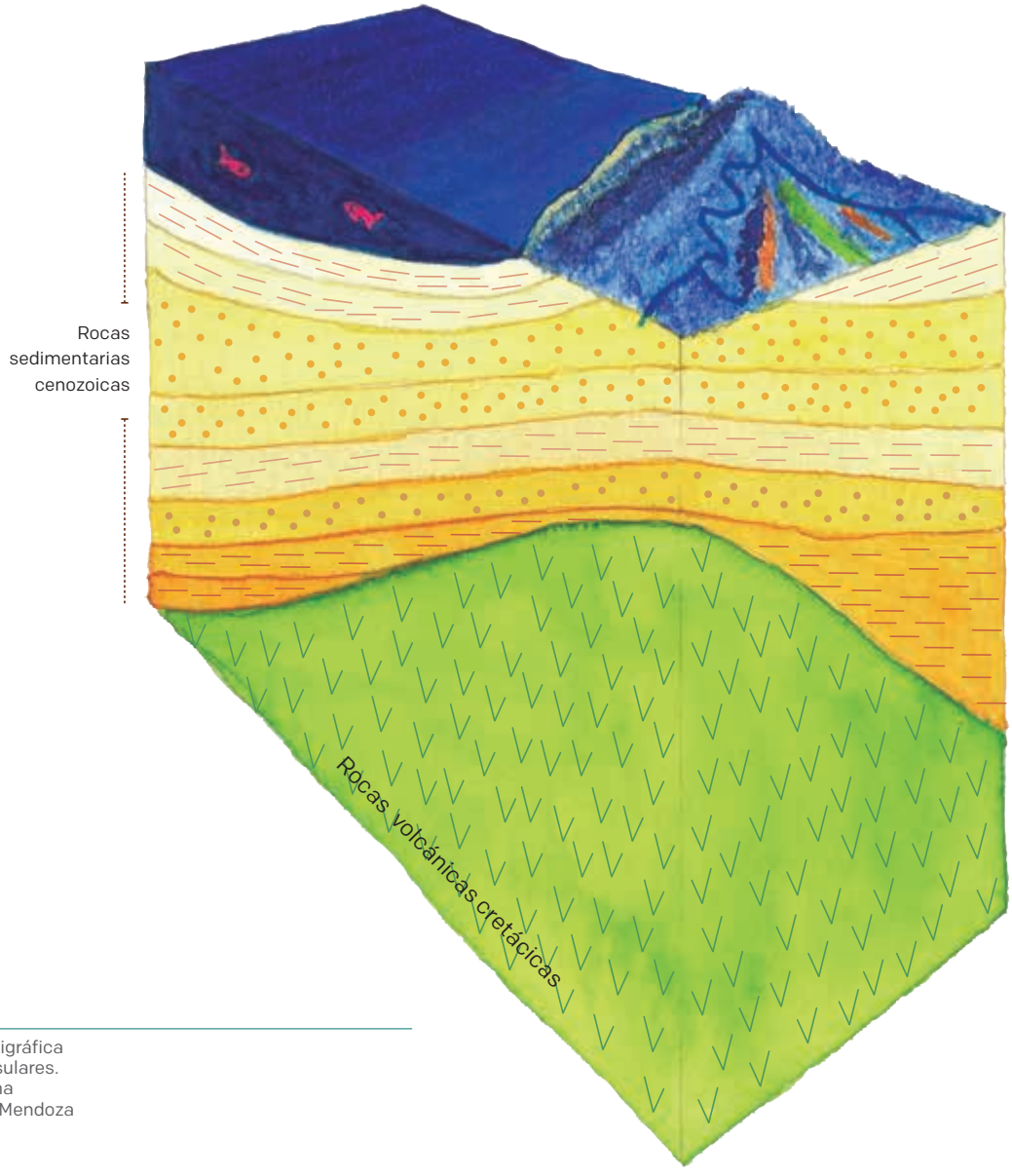
La cordillera Central, por su parte, está constituida por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de origen continental y marino, cuyas edades varían desde el Carbonífero (era Paleozoica) hasta el Cretácico (era Mesozoica). Estas rocas son comunes también en la Sierra Nevada de Santa Marta y las serranías de Macuira y Jarará, en el norte de Colombia. Rocas sedimentarias y volcánicas continentales del Mioceno-Plioceno (11-5.3 Ma) revisten gran parte de las rocas precenozoicas de la cordillera Central. Una gran porción de la cordillera Central colombiana ha sido también cubierta por cenizas provenientes

de erupciones volcánicas más recientes de 2.8 Ma, que han configurado las principales unidades geológicas que han dado origen a los materiales parentales de muchos suelos cafeteros.

La cordillera Central está separada de la cordillera Occidental por el valle del río Cauca, segunda arteria fluvial más importante de Colombia. A diferencia de la cordillera Central, la cordillera Occidental está compuesta en su mayoría por rocas ígneas (volcánicas e intrusivas) y sedimentarias de origen oceánico, cuyas edades van desde el Cretácico hasta el Oligoceno (125-28 Ma). Algunas de las unidades geológicas presentes en la parte norte de la cordillera Occidental se extienden hasta Panamá, y en su interior se esconde el registro de uno de los eventos geológicos más importantes del mundo: el cierre del istmo de Panamá.



Columna estratigráfica de la cordillera Occidental. Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza



Columna estratigráfica de las zonas insulares. Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza

Finalmente, el territorio colombiano también comprende una parte oceánica, donde se encuentran varias áreas emergidas denominadas *islas* y *archipiélagos*. Las áreas marinas emergidas más importantes son el archipiélago de San Andrés y Providencia, la isla Gorgona y la isla de Malpelo. Todas ellas están formadas por rocas volcánicas e intrusivas cretácicas y cenozoicas de origen marino, que posteriormente han sido cubiertas por rocas sedimentarias de origen marino del Cenozoico. Mientras que el archipiélago de San Andrés y Providencia posee la reserva natural de arrecifes coralinos más grande de Colombia, la isla de Malpelo exhibe el único registro geológico existente en Colombia del increíble impacto del meteorito que extinguió los dinosaurios hace 65 millones de años.

Evolución geológica de Colombia

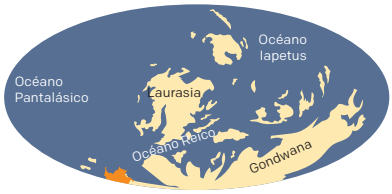
La evolución geológica del norte de Suramérica se puede estudiar a partir de las rocas que se encuentran en el territorio colombiano. Dicha evolución ha estado influida por la interacción de varios factores, como la actividad tectónica, la actividad volcánica, los cambios climáticos, los cambios del nivel del mar y los cambios biológicos, entre otros. La interacción de estos factores ha dejado un registro geológico extraordinariamente diverso, que es patrimonio nacional.

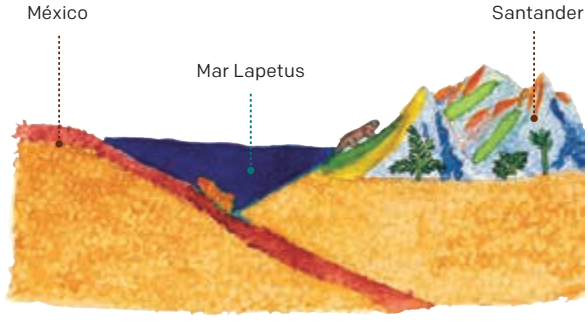
La evolución geológica de Colombia está científicamente bien documentada desde el final de la era Paleozoica (300-250 Ma), cuando el territorio colombiano hacía parte del supercontinente Pangea, que resultó de la unión de los continentes Gondwana y Laurasia (340 Ma). La documentación de la evolución geológica de Colombia del periodo previo a la formación el supercontinente Pangea es menos clara. Estudios geológicos sugieren que antes de la aglutinación de Pangea, el territorio colombiano hacía parte del continente Gondwana, junto con fragmentos de los actuales continentes de Suramérica, África, Oceanía, India y Antártida. Por entonces, Norteamérica, Europa y Asia hacían parte del continente Laurasia, separado de Gondwana por los océanos Reico e Iapetus. Durante el final del Paleozoico, más específicamente durante el Devónico-Carbonífero (410-290 Ma), el territorio colombiano estaba cubierto por el mar. Relictos de rocas sedimentarias dejadas por este mar se encuentran a lo largo de la cordillera Oriental colombiana.

Durante el límite entre las eras Paleozoica y Mesozoica, límite entre los periodos Pérmico y Triásico, el territorio colombiano estaba localizado en latitudes ecuatoriales a lo largo de la margen occidental del supercontinente Pangea. Pangea se encontraba rodeada por el océano Pantalásico, que a su vez estaba en contacto con el mar de Tetis, que era de carácter semirrestringido y se encontraba en la parte interior de Pangea. En Colombia, el registro geológico Pérmico-Triásico está constituido principalmente por rocas ígneas que se encuentran hoy en día a lo largo de la cordillera Central. Estas rocas, que intruyeron otras más antiguas (del Paleozoico Medio), hacían parte de un gran sistema montañoso orogénico llamado Gonwanides, que se extendía a lo largo de la margen occidental y sur del supercontinente Pangea. En la actual cordillera Oriental, las rocas sedimentarias calcáreas marinas del Pérmico-Triásico, evidencian que el océano Pantalásico llegó a inundar las márgenes del Escudo de la Guyana.

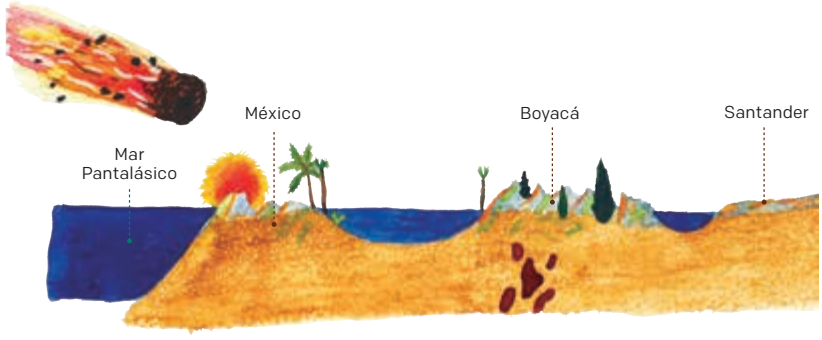
Posteriormente, durante el periodo Jurásico, el supercontinente Pangea comenzó a fragmentarse, y entonces Laurasia y Gondwana nuevamente se separaron. En Colombia, el inicio de esta separación quedó registrado en las rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias continentales del Jurásico Temprano, que en la actualidad se encuentran en la cordillera Oriental y a lo largo de las serranías del norte de Colombia (Perijá, Sierra Nevada de Santa Marta, Macuira y Jarará). Estos registros sedimentarios, que se caracterizan por la presencia de capas rojas, fueron depositados por grandes sistemas de ríos que atravesaban el territorio colombiano durante un periodo de altas temperaturas globales. Las altas temperaturas globales fueron el resultado del efecto invernadero originado por grandes adiciones de CO_2 volcánico a la atmósfera. El efecto global de las altas temperaturas es evidenciado por la presencia de depósitos continentales ricos en capas rojas, en gran parte de los territorios de Norteamérica, Perú, Bolivia, Venezuela y México.

a 400 Ma

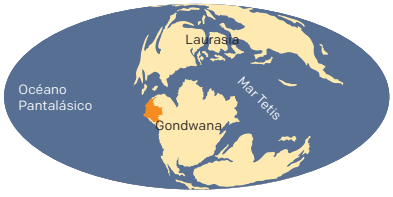


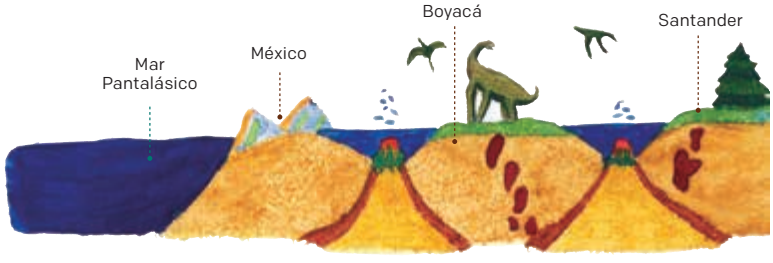


b 250 Ma

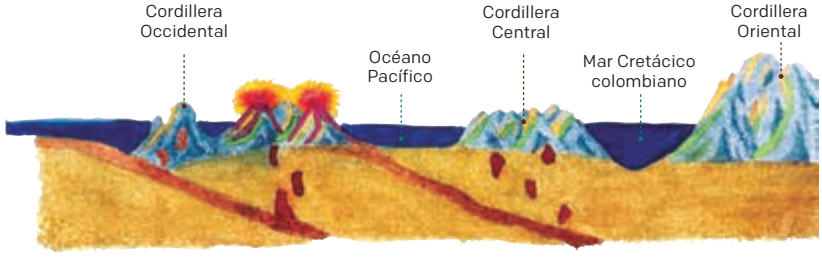


c 150 Ma

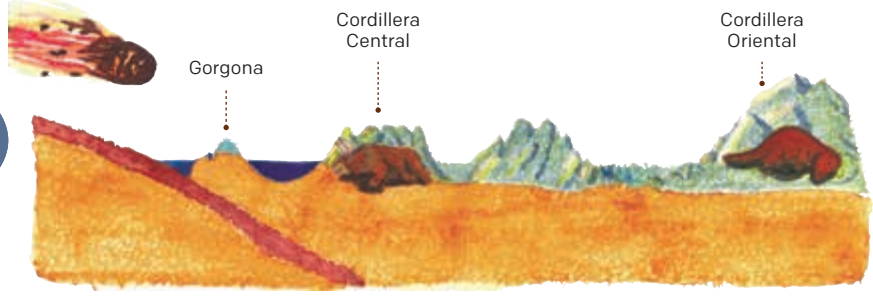




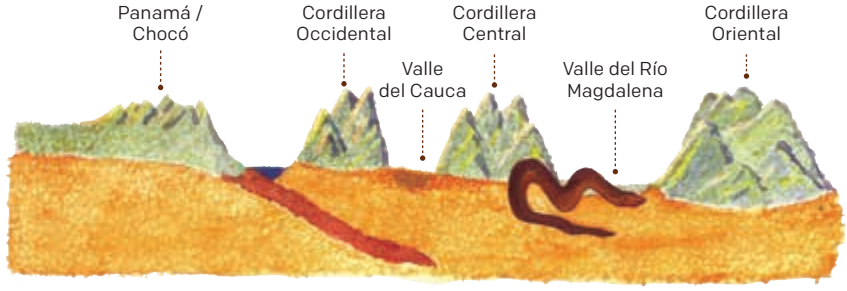
d 100 Ma



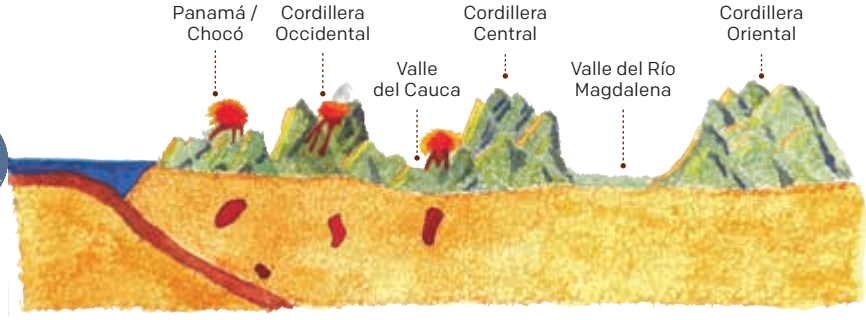
e 65 Ma



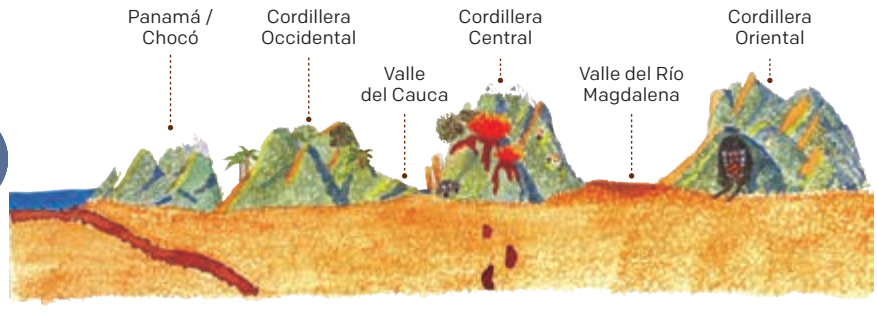
f 55 Ma



g 15 Ma



h Presente

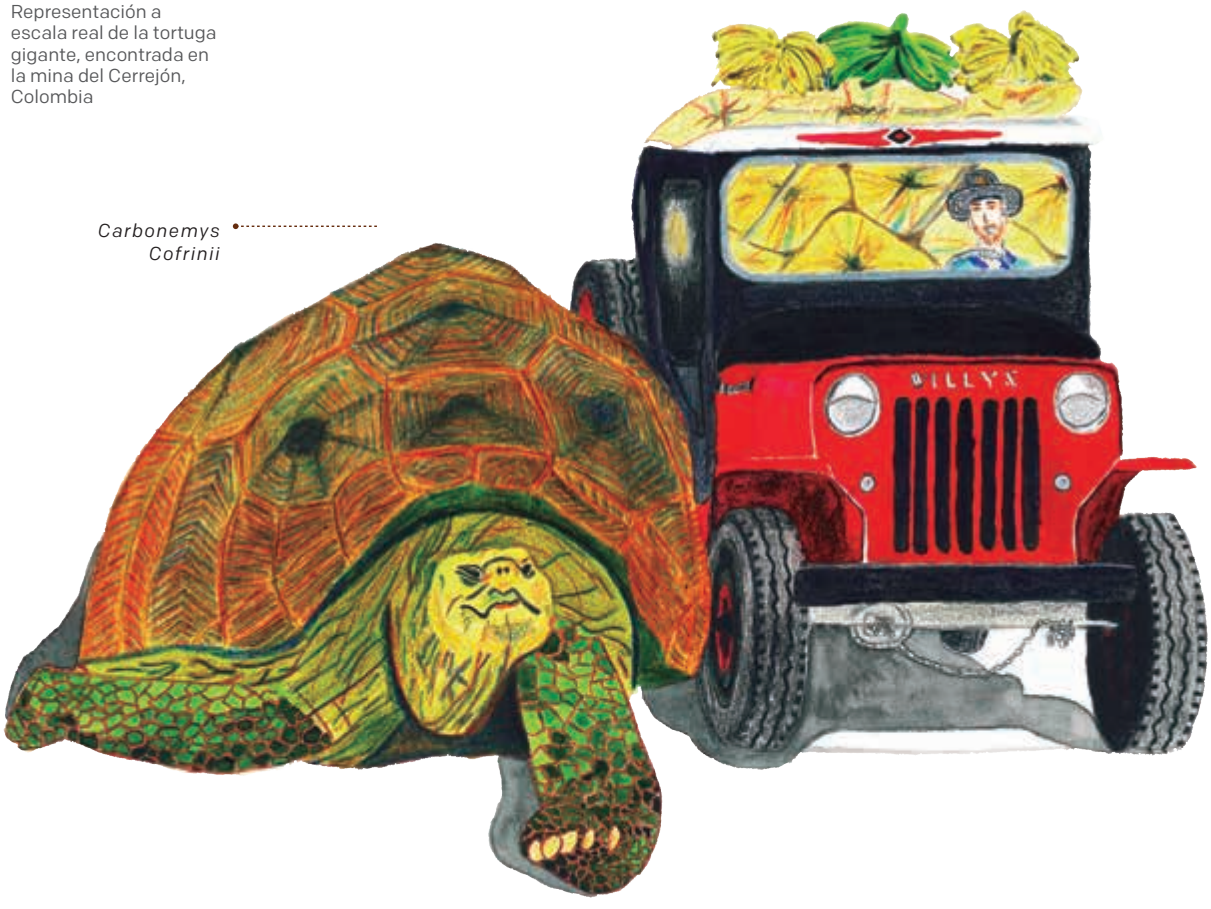


a. Localización geográfica de Colombia durante el Devónico (380 Ma). Nótese que Colombia se encontraba en latitudes altas, hacía parte del continente Gondwana.
b. Localización geográfica de Colombia durante la parte final del periodo Pérmico (260 Ma). Nótese cómo la parte occidental de Colombia (actual cordillera Central) presentaba cadenas montañosas que resultaron de la orogenia Gonwanide. Obsérvese también cómo un mar poco profundo ocupaba gran parte de lo que hoy es la cordillera Oriental y se extendía a Venezuela y Perú. Notesé, además, cómo un meteorito pudo haber causado la madre de todas las extinciones al final del Paleozoico (Pérmico).
c. Localización geográfica de Colombia durante el periodo Jurásico (150 Ma). Nótese que el supercontinente Pangea se fragmenta y Laurasia se separa de Gondwana. También se puede observar cómo el territorio colombiano se queda unido a Gondwana. Asimismo, es evidente cómo durante este periodo gran parte del territorio colombiano se encontraba emergido.
d. Localización geográfica de Colombia durante el Cretácico Temprano (120 Ma). Nótese que Laurasia se ha separado de Gondwana. También se puede apreciar cómo el continente suramericano se comienza a separar del africano. Obsérvese también cómo durante este periodo gran parte del territorio colombiano se encontraba inundado por el océano.
e. Localización geográfica de Colombia durante el final de Mesozoico y el inicio del Cenozoico (límite Cretácico-Paleoceno, 65 Ma). Nótese cómo los continentes suramericano y africano se han separado completamente. En Colombia los mares del Cretácico comienzan a retirarse y llegan nuevas masas de tierras asociadas a la placa tectónica del Caribe. En este periodo el calentamiento global y el impacto de un meteorito causaron la muerte de los dinosaurios.
f. Localización geográfica de Colombia durante la primera parte del Cenozoico (Paleógeno). Nótese cómo la mayoría del territorio colombiano está sobre tierras emergidas.
g. Localización geográfica de Colombia durante el Mioceno Tardío. Obsérvese cómo la mayoría del territorio colombiano ya presenta la configuración actual. También se puede apreciar cómo el istmo de Panamá está casi completamente cerrado y separando el océano Pacífico del mar Caribe. Esto permitió el intercambio biológico entre Norte y Suramérica hace 4 millones de años
h. Configuracion actual del territorio colombiano.

La evolución geológica del norte de Suramérica se puede estudiar a partir de las rocas que se encuentran en el territorio colombiano. Dicha evolución ha estado influenciada por la interacción de varios factores, como la actividad tectónica, la actividad volcánica, los cambios climáticos, los cambios del nivel del mar y los cambios biológicos, entre otros. La interacción de estos factores ha dejado un registro geológico extraordinariamente diverso, que es patrimonio nacional.

El pico de la separación de Laurasia y Gondwana ocurrió hace 150 Ma, en el Jurásico Medio-Tardío. Durante este periodo de tiempo, el territorio colombiano permaneció unido a la parte noroccidental del continente Gondwana. La fragmentación del supercontinente Pangea dio paso a la formación de un mar llamado Atlántico Central, que se comunicaba con el océano Pacífico y el mar de Tetis. A medida que los dos continentes se separaban, grandes incursiones marinas ocurrían en el norte de Colombia, mientras que en el centro y oriente del territorio dominaban planicies de ríos. Siguiendo el curso de la evolución a partir de la separación de Laurasia y Gondwana, durante el periodo Cretácico, tuvo lugar el establecimiento del Atlántico norte. Durante el Cretácico Temprano (145-113 Ma), el mar inundó las tierras bajas emergidas del centro del territorio colombiano a lo largo de lo que se conoce como *cuenca Cretácica Marina de Colombia*. Este registro sedimentológico se encuentra actualmente en las cordilleras Oriental y Central. Estas transgresiones marinas (entrada del mar al continente) ocurrieron bajo la influencia de climas cálidos extremos que dejaron registros sedimentarios caracterizados por la presencia de carbonatos, lutitas y *cherts*, con abundantes materiales fósiles. El registro fósil más reconocido es el de la zona de Villa de Leyva, donde se han encontrado grandes reptiles acuáticos (plesiosauros e ictosaurios, entre otros) del Cretácico Temprano.

Más tarde, durante el Cretácico Tardío, el mar que invadió el centro y oriente de Colombia comenzó a retirarse. El retroceso del mar (regresión) coincidió con el levantamiento inicial de la cordillera Central y dio paso a la ocurrencia de zonas



Representación a escala real de la tortuga gigante, encontrada en la mina del Cerrejón, Colombia

emergidas donde predominaron sedimentos típicos de zonas litorales y deltas. El Cretácico Tardío también puso en evidencia la llegada de las rocas volcánicas y sedimentarias de origen marino que componen gran parte de la cordillera Occidental. Estas rocas se originaron en el occidente del continente suramericano durante el Cretácico Temprano. Durante el Cretácico Tardío también se registró la división del continente Gondwana y la separación de Suramérica de África. Esta separación dio origen al paleotrópico (África septentrional) y al neotrópico (Suramérica septentrional), donde quedó ubicada Colombia.

A comienzos de la era Cenozoica (Paleoceno-Eoceno, 66-33 Ma) comenzó la elevación de las tierras bajas del centro y oriente colombiano. En este proceso, conocido como orogenia preandina, se originaron las cordilleras Central y Oriental, y con ellas se formaron los valles superior, medio y bajos del río Magdalena. Para ese entonces, la zona norte de Colombia, los llanos orientales, la Orinoquia y la Amazonia continuaban siendo tierras bajas. El registro geológico de este periodo consiste principalmente de rocas sedimentarias, la mayoría de origen continental (depósitos de ríos).

Por otro lado, el registro geológico y paleontológico colombiano muestra la existencia de un clima extremadamente cálido que generó alta pluviosidad a lo largo de nuestro territorio, con lo cual se formaron grandes zonas pantanosas donde se depositaron sedimentos ricos en materia orgánica. Tuvieron que pasar millones de años para que estos pantanos se convirtieran en espesos mantos de carbón durante el Cenozoico Tardío (Mioceno-Plioceno). Estos sedimentos esconden uno de los registros fósiles más ricos y diversos de Colombia. Un ejemplo es el registro fósil de El Cerrejón, donde fue hallado recientemente el fósil de la boa constrictora más grande registrada hasta ahora en el mundo, la *Titanoboa cerrejonensis*. En ese mismo periodo vivieron tortugas gigantes que podían comer cocodrilos y alcanzaban el tamaño de un automóvil.

Durante el Oligoceno (33-23 Ma) la cordillera Occidental comenzó a elevarse, al tiempo que las cordilleras Central y Occidental aceleraban su levantamiento, debido a la tectónica de placas. Este periodo coincidió con la interacción de masas continentales de Centro y Suramérica, y que alcanzó su clímax en el Mioceno, cuando se cerró el istmo de Panamá (13 Ma). Este evento dio paso a dos de los más grandes sucesos biológicos de la Tierra de los últimos 65 millones de años: el intercambio de biota entre Norteamérica y Suramérica y el nacimiento de la selva amazónica. En el intervalo del Mioceno-Plioceno se inició la orogenia andina, y con ella se reactivó la actividad magmática a lo largo de las cordilleras Occidental y Central. Este magmatismo generó rocas volcánicas y volcano-sedimentarias que se extienden a lo largo de los valles de los ríos Cauca y Magdalena.

Representación a escala real de la *Titanoboa cerrejonensis*. Nótese como las vértebras fósiles de este ejemplar, que fueron encontradas en la mina de carbón de El Cerrejón, en el norte de Colombia , son de mayor dimensión que aquellas de la constrictora más grande que existe actualmente en el planeta Tierra.
Pintura de Karina Andrea Portilla Mendoza