

## EL SUELO EN LA FASE SUPERFICIAL DEL CICLO GEOLÓGICO

Graciano Elizalde<sup>1</sup>

*Universidad Central de Venezuela, Instituto de Edafología,  
Facultad de Agronomía, Maracay*

*Recibido: diciembre 2009*

*Aprobado: febrero 2010*

### Resumen

Entre las capas más externas de la Tierra (vistas desde afuera hacia adentro: atmósfera, hidrósfera, biósfera, pedósfera, litósfera), ocurren constantes e importantes intercambios de materia y energía. Este trabajo propone un modelo de las relaciones entre los componentes y procesos resultantes de esos intercambios. La particularidad del ciclo propuesto radica en la inclusión del suelo y de la biota como partícipes en varios de los grandes procesos que caracterizan la evolución del planeta. El suelo, por su ubicación, es el lugar de interacción donde se desarrollan los intercambios entre la litósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera, resulta un componente terrestre importante para comprender los flujos de materia y energía durante la evolución de la Tierra. A su vez, la inclusión de este cuerpo en el ciclo evolutivo de la Tierra proporciona a los pedólogos y edafólogos una perspectiva integral para el estudio y comprensión de la génesis del suelo y su papel como "epidermis" de la parte rocosa de la Tierra y su relación con los demás componentes externos. El objetivo de este trabajo es presentar una versión del ciclo geológico, específicamente de su fase superficial, que explique la relación de los suelos con los demás componentes de la Tierra (principalmente los sólidos), conceptualmente útil tanto para la investigación como para la enseñanza.

**Palabras claves:** Componentes de la tierra, ciclo geológico, fase superficial, interacción, suelo, enseñanza.

### THE SOIL AT THE SUPERFICIAL STAGE OF GEOLOGICAL CYCLE

### Abstract

Between the external layers of the Earth (view from outside inward: atmosphere, hydrosphere, biosphere, pedosphere, lithosphere), occurs consistent and important exchanges of matter and energy. This work proposes a model of relationship between the components and processes of those exchanges. The peculiarity of

---

<sup>1</sup> Ing. Agrónomo, PhD en Sedimentología Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, UCV Maracay [Email: elizaldeg@agr.ucv.ve](mailto:elizaldeg@agr.ucv.ve), [gracianoelizalde@yahoo.com](mailto:gracianoelizalde@yahoo.com)

the proposed cycle was the inclusion of soil and biota as taking rolls in several of the major processes in the evolution of the planet. The soil, by its location, is the place of interaction where exchanges are developed between lithosphere, hydrosphere, atmosphere and the biosphere; it results as an important earth component to understand the flow of matter and energy during Earth evolution. At the same time, the inclusion of this body in the cycle of evolution of Earth provides pedólogos and agro-engineers a comprehensive approach to the study and understanding of the genesis of the soil and its role as “epidermis” of the rocky side of Earth and its relation with other external components. The aim of this work is to present a version of the geological cycle, specifically of the superficial phase, to explain the relationship of soils with other components of the Earth (chiefly solids), conceptually useful for both research and education.

**Keywords:** geological cycle, superficial phase, interaction, soil, research.

## 1. Introducción

Los once componentes sólidos principales de la Tierra y los 8 componentes líquidos, se enlazan en un gran ciclo geológico con los principales procesos involucrados. Este ciclo se compone de una fase superficial y de una fase profunda. En la fase superficial se distinguen once grandes y complejos procesos que intervienen en tres secuencias (de meteorización, pedogenética y volcánica) y tres ciclos (de erosión – sedimentación, el biogeoquímico y el sedimentario), cuyo conjunto constituye la fase superficial del ciclo geológico propuesto. En la fase profunda se incluyen 5 grandes procesos, involucrados en varios ciclos, los cuales no se desarrollan en este trabajo.

Las secuencias y ciclos anteriores, se desarrollan en la fase superficial del ciclo geológico a expensas de los aportes de materia y de energía. Estos aportes están determinados por un conjunto de factores complejos comunes a todos ellos: materiales de origen o parentales, condiciones del relieve, condiciones del clima, características de la biota, tiempo de evolución y actividades humanas. Se deriva de ello que los atributos y el estado (como condición química, física y fisicoquímica) de los materiales de la fase superficial del ciclo geológico son una función que puede ser expresada por la ecuación:  $mslfscg = f(mo,cl,r,b,t,h)$ , donde **mslfscg** significa **materiales sólidos y líquidos de la fase superficial del ciclo geológico**, cuyas características son función de la interacción de: **mo** = material de origen; **cl** = condiciones del clima; **r** = condiciones del relieve; **b** = características de la biota; **t** = tiempo de evolución e interacción de los otros factores; **h** = actividades humanas.

El ciclo geológico propuesto permite ver al suelo como uno de los cuerpos resultantes de la evolución de la Tierra y evidencia su participación activa en

dicha evolución. Es una herramienta que ayuda a generalizar los resultados de mediciones a pequeña escala o experimentos de campo, para obtener estimaciones válidas a escala regional o global, bajo un enfoque interdisciplinario

## **2. Sistema Terrestre: capas esféricas concéntricas, componentes e interacciones**

El planeta Tierra, como sistema, puede concebirse compuesto de una serie de capas esféricas concéntricas, que encajan unas dentro de las otras, cuya interacción permanente conlleva a importantes intercambios de energía y de materia entre ellas. De afuera hacia adentro, las cinco primeras son: atmósfera, hidrósfera, biósfera, pedósfera, litósfera. La atmósfera constituye la capa más externa del planeta y concentra casi exclusivamente componentes gaseosos; le sigue la hidrósfera, que reúne al componente acuoso (quizás corresponda mejor decir soluciones acuosas); las otras tres se refieren a distintos tipos de componentes sólidos: la biósfera constituida por los componentes vivos y aquellos que derivan directamente de ellos, como sus excretas y restos muertos, la pedósfera se refiere a suelos y la litósfera centra su composición en rocas. Luego de la litósfera siguen hacia el centro el manto y, finalmente, el núcleo terrestre, cuyas composiciones y procesos no se discutirán, ya que este ensayo se enfocará en los procesos de las capas superficiales. Las composiciones indicadas anteriormente se refieren al componente característico o modal, pero todas esas esferas contienen, además, una alta variedad de elementos y sustancias. Ello es debido, en parte, a que las distintas capas, si bien ocupan preferentemente los sitios mencionados, tienden a compartir el espacio de una manera no excluyente, lo que facilita el desarrollo de importantes interrelaciones.

Los espesores de las distintas capas son bastante diferentes y ello determina que los procesos que ocurren en ellas se estudien y representen a escalas distintas, tanto espacial como temporal (Cuadro 1).

**Cuadro 1:** Espesores aproximados de las capas o esferas más superficiales de la Tierra

<b>CAPA</b>	<b>ESPESOR ( km)</b>
ATMÓSFERA	700 a 800
HIDRÓSFERA	0,01 a 11
BIÓSFERA	0,01 a 11
PEDÓSFERA	0 a 0,01
LITÓSFERA	30 a 80

Casi todas las esferas mencionadas constituyen superficies continuas, como la atmósfera y la litósfera, que rodean todo el planeta; pero la pedósfera, se caracteriza por su escaso espesor que permite concebirla como un delgado manto o “epidermis” restringido a las áreas continentales emergidas (es decir, no cubiertas de agua), donde están ausentes los hielos permanentes y no existen afloramientos rocosos, por lo cual no sólo es muy delgada, sino que es una superficie esférica discontinua.

De acuerdo a su constitución, las distintas capas tienen diferentes grados de variabilidad espacial y temporal. La atmósfera, compuesta de fluidos gaseosos, si bien presenta variaciones espaciales tanto en sentido horizontal (en coordenadas de latitud y longitud) como vertical de sus propiedades químicas y parámetros físicos, a pesar de su volumen es mucho más homogénea a nivel planetario que las otras y el intercambio de componentes entre las distintas porciones es relativamente rápido. Se estima que el tiempo de residencia de los gases atmosféricos varía desde unos 9 días para el agua (vapor), 5 años para el CO<sub>2</sub> y unos 4.000 años para el O<sub>2</sub> (Schlesinger, 2000). Lo contrario ocurre con las capas de materiales sólidos. La litósfera presenta en la actualidad gran variabilidad espacial y ha manifestado grandes variaciones de composición y estructura a lo largo de la historia terrestre (variabilidad temporal). Esa variabilidad es resultado de su estado sólido y gran volumen, por lo cual el tiempo de residencia de la mayor parte de sus componentes es muy grande, de manera que el intercambio necesario para disminuir la variabilidad espacial demora millones de años en alcanzar un cierto equilibrio. La pedósfera, por su papel de superficie de separación o *epidermis*, que le hace interactuar con las otras capas superficiales de la estructura de la Tierra, y su delgadez, tiene un comportamiento intermedio: presenta una gran variabilidad espacial, ya que es sensible a las variaciones de los otros componentes (atmósfera, hidrósfera, biósfera y litósfera), pero algunos de los procesos que en ella ocurren y tienden a homogeneizarla, se desarrollan en forma poco menos que instantánea, mientras que otros son estacionales a lo largo del año, y otros insumen decenas de miles de años.

Para conocer las relaciones entre esos componentes y los procesos que en ellos ocurren, se han propuesto numerosas versiones del “CICLO GEOLÓGICO”, como puede comprobarse en una sencilla búsqueda en Internet.<sup>12</sup>

La mayoría de esas versiones centran su atención en los procesos que afectan a las rocas y a la litósfera en general, por su condición de esfera que, entre las cinco más externas, es la que reúne la mayor masa y que, desde muchos puntos de vista, se considera como representativa de la “verdadera” Tierra. Algunos de esos ciclos, aunque centran su atención en las rocas, incluyen las

interacciones entre la litósfera, la hidrósfera y la atmósfera; unos pocos toman en cuenta también a la biósfera, pero curiosamente prácticamente ninguno incluye al suelo. Una de las excepciones corresponde al esquema de Brion (sf).

Sin embargo, el suelo, por su ubicación en el espacio de interacción entre la litósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera, resulta un componente terrestre de suma importancia para comprender los flujos de materia y energía que dan lugar a la evolución y las relaciones de las esferas superficiales del planeta. Además, la inclusión del suelo en el ciclo evolutivo de la Tierra, proporciona una visión más integral para estudios de pedogénesis, concibiendo al suelo como la *epidermis* de la parte rocosa de la Tierra, que la mantiene en comunicación con los demás componentes externos.

### **3. Definiciones y descripción**

Los componentes sólidos de la Tierra, que constituyen la litósfera, la pedósfera y la biósfera, son materiales que pertenecen a uno de estos grandes conjuntos: rocas ígneas plutónicas, rocas metamórficas, rocas sedimentarias, sedimentos, regolitos, materiales sueltos in situ, rocas ígneas volcánicas, material piroclástico, suelos y biomasa; a ellos se suma el hielo (constituyente de la hidrósfera). La mayoría se ubica en la fase superficial del ciclo geológico, es decir que están en contacto directo con la hidrósfera, la biósfera y la atmósfera, donde la energía proveniente de fuentes exógenas (radiación solar, energía gravitacional potencial controlada por el relieve, energía de la biomasa, energía hidráulica) supera a la energía de origen endógeno (calor interno del planeta, energía gravitacional potencial controlada por la profundidad).

Un menor número de componentes sólidos se ubica en profundidad en la litósfera, donde interactúan por medio de procesos alimentados predominantemente por fuentes endógenas de energía y de esa forma constituyen la fase profunda del ciclo geológico.

Los componentes líquidos corresponden al agua marina y al agua continental superficial de escorrentía difusa, encauzada, acumulada en lagos o pantanos, agua subsuperficial en poros, grietas, acuíferos, que están en la fase superficial, y agua magmática, que se ubica en la fase profunda. También deben tomarse en cuenta los magmas y las lavas, como materiales líticos fundidos, en estrecha relación con las rocas.

En la fase superficial se reconocen 11 grandes y complejos procesos y en la fase profunda se incluyen 5 grandes procesos, en los que participan los componentes señalados anteriormente; ellos son los indicados en los cuadros 2 y 3.

El ciclo geológico se ha elaborado mediante el ensamble ordenado de

materiales o componentes y procesos, enlazados por medio de vectores que destacan las relaciones principales. Los materiales se han identificado con letras mayúsculas negras y los procesos con letras minúsculas rojas. En general no se han señalado los factores que son necesarios para el desarrollo de los distintos procesos, entre ellos la presencia de agua y el contacto con la atmósfera.

**Cuadro 2:** Procesos que ocurren en la fase superficial del ciclo geológico

FASE SUPERFICIAL	
PROCESO	DESCRIPCIÓN
<b>Erupción</b>	el magma emerge para formar lava y liberar gases (principalmente vapor de agua) <sup>3</sup>
<b>Cristalización</b>	de la lava para formar rocas ígneas volcánicas, debido a la disminución brusca de la temperatura y de la presión
<b>Explosión</b>	del aparato volcánico, lo que produce la proyección de gases, líquidos y sólidos triturados, dando lugar a los sedimentos volcánicos
<b>Meteorización</b>	de las rocas presentes en la fase superficial, lo que da lugar a la formación de regolitos y cambios en la composición de las soluciones acuosas
<b>Separación</b>	proceso que se ejerce sobre los materiales blandos (regolitos, sedimentos, suelos y biomasa) para separar las partículas o elementos que los componen y formar materiales sueltos o soluciones acuosas, y así dar inicio a la erosión
<b>Transporte</b>	de los materiales sueltos o disueltos, que sigue y complementa a la separación, para completar la erosión
<b>Sedimentación</b>	del material suelto o disuelto transportado, la cual conduce a la acumulación de sedimentos, ya sean éstos, detritos o precipitados químicos
<b>Diagénesis</b>	que representa el conjunto de transformaciones postsedimentarias, esencialmente compactación y cementación, que conducen a la litificación de los sedimentos y su transformación en rocas sedimentarias <sup>4</sup>
<b>Actividad biológica</b>	referida a las actividades vitales de toda la macro y micro flora y fauna (aérea, acuática y terrestre), cuyos cuerpos (vivos o muertos) acumulados, constituyen la biomasa, la cual será transformada o erosionada (separada en distintas fracciones y transportada)
<b>Transformación de la biomasa</b>	in situ, principalmente a través de la actividad microbiológica, para dar lugar a la formación de materiales orgánicos e inorgánicos distintos a la biomasa original, que al acumularse constituyen sedimentos orgánicos no transportados
<b>Pedogénesis</b>	transformación de los sedimentos y regolitos ubicados en el espacio de interacción entre la litósfera, la hidrósfera, la biósfera y la atmósfera para formar suelos. Esas transformaciones son el resultado de numerosos procesos no independientes que, en conjunto, constituyen el macro proceso denominado pedogénesis y les confieren a los suelos una composición, estructura, color y muchas otras propiedades que los identifican y diferencian en mayor o menor grado de los materiales parentales (sedimentos y regolitos) de los que provienen. Funcionalmente los suelos se definen como materiales aptos para proporcionar a las plantas el soporte mecánico, así como el agua, aire y nutrientes que necesitan para su nacimiento, desarrollo y reproducción

**Cuadro 3:** Procesos que ocurren en la fase profunda del ciclo geológico

FASE PROFUNDA	
PROCESO	DESCRIPCIÓN
<b>Metamorfismo</b>	representa el conjunto de transformaciones que sufren las rocas (sedimentarias, ígneas o metamórficas), cuando son sometidas a altas presiones y altas temperaturas, pero se mantienen en estado sólido y dan lugar a las rocas metamórficas <sup>5 6</sup>
<b>Fusión</b>	ocurre cuando las rocas metamórficas son sometidas a temperaturas que superan ciertos niveles críticos y se funden transformándose en magma
<b>Granitización o Anatexis</b>	proceso mediante el cual las rocas metamórficas se enriquecen en cuarzo y feldespatos, adquieren una estructura masiva y se transforman en granitos o rocas similares, sin pasar por el estado de fusión completo
<b>Emplazamiento</b>	corresponde a la reubicación del magma, generalmente ascendiendo desde el sitio donde se ha formado hasta un sitio donde se acumula y pierde calor hasta cristalizar en forma de roca ígnea intrusiva (plutónica o hipabisal)
<b>Cristalización del magma</b>	debida a la pérdida de calor hacia el ambiente que rodea o contiene el reservorio magmático, que da lugar a la formación de minerales de las rocas ígneas plutónicas o hipabisales <sup>7 8 9</sup>

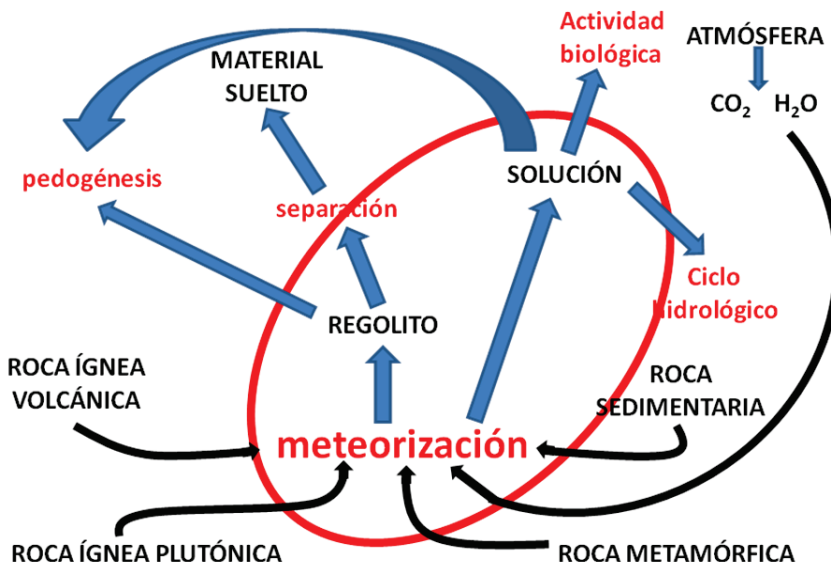
Es posible reconocer dentro de cada una de las fases (superficial o profunda) varios ciclos y secuencias. Las secuencias, al igual que los ciclos, están formadas por materiales y procesos; en ellas se distinguen entradas y salidas, constituidas por uno o varios materiales o procesos, pero en las secuencias la distribución es lineal y no existen las vías de retorno iterativo que caracterizan a los ciclos. Las secuencias forman parte de algún ciclo y a la vez algunos ciclos forman parte de ciclos mayores, así como el conjunto de todos constituye el ciclo geológico.

### 3.1. Secuencia de meteorización

Una de las secuencias característica de la fase superficial, es la de meteorización (Figura 1). Para su inicio se requiere que las rocas sean expuestas a la acción de agentes atmosféricos, hídricos y bióticos (entradas), los cuales desencadenan una serie de reacciones que producen cambios físicos, químicos y fisicoquímicos en las rocas, transformándolas en dos nuevos tipos de materiales: regolito y solución (salidas). En general este regolito ha perdido algunos de los minerales inicialmente presentes en las rocas de entrada, tiene menores cantidades de elementos solubles, contiene nuevos minerales formados durante el proceso (minerales secundarios) y es menos resistente a los esfuerzos mecánicos que las rocas sin meteorizar. La solución contiene los elementos extraídos de los minerales al descomponerlos, que no pueden ingresar a las estructuras de los minerales neoformados.

El regolito puede seguir dos caminos: ser una de las entradas de la secuencia pedogenética, o una de las entradas del ciclo de erosión - sedimentación (separación). La solución puede seguir caminos diversos dentro del denominado ciclo hidrológico<sup>10</sup>, entre ellos volver a participar en otras etapas del ciclo geológico, como por ejemplo contribuir al transporte de sedimentos, favorecer la actividad biológica o contribuir con la pedogénesis.

A través de la meteorización se establece una de las conexiones entre los materiales y procesos de la fase superficial y las rocas que caracterizan la fase profunda del ciclo geológico. El proceso de meteorización es sumamente importante y con un alto número de publicaciones que lo exponen con diverso grado de detalle, entre ellas se cuentan Malagón (1979), Porta y colaboradores (1999) y Dixon y Weed (1989).



**Figura 1:** Secuencia de meteorización, ocurre en la fase superficial del ciclo geológico. Los regolitos y la solución resultantes de la meteorización siguen diversos destinos dentro y fuera del ciclo geológico.

### 3.2. Ciclo de erosión-sedimentación

El ciclo de erosión-sedimentación (figura 2), tiene cinco entradas: 1) regolitos, 2) biomasa, 3) suelos, 4) sedimentos preexistentes y volcánicos, los cuales son afectados por los procesos de separación o de sedimentación y 5) soluciones, que actúan en el transporte dentro del este ciclo.

La separación consiste ya sea en la disolución directa (separación de iones y elementos), reacciones químicas que transforman algunos de los compuestos

originales en otros más solubles, o en el desprendimiento físico de partículas individuales o agregados.

La disolución, como parte del ciclo de erosión-sedimentación, se ejerce principalmente sobre los elementos y compuestos fácilmente solubles como el  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}$ , contenidos en los suelos, la biomasa o los sedimentos. El agente más importante, obviamente, es el agua, pero su efectividad se incrementa con la presencia de sustancias acidificantes (como el  $\text{CO}_2$ ), o quelatantes, como numerosos compuestos orgánicos simples o complejos, como los ácidos acético, cítrico, oxálico, fúlvicos y húmicos.

Entre las reacciones bioquímicas que transforman las sustancias poco solubles en otros derivados más solubles separándolos de sus lugares de residencia originales, además de la clásica reacción entre el carbonato de calcio y el ácido carbónico ( $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{++}$ ), que libera los iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , cabe destacar la degradación de la materia orgánica por la actividad bacteriana (aerobia o anaerobia), que libera el N de las moléculas orgánicas complejas para dar lugar a la formación de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  y compuestos orgánicos más simples, como los ya citados ácidos acético, cítrico, oxálico. Se conocen múltiples reacciones similares que involucran a otros elementos importantes como el S, P, etc.

El desprendimiento físico de partículas individuales o agregados, se efectúa por la acción de una fuerza externa o interna (hinchamiento o contracción por cambios de temperatura, explosión de aire atrapado en poros, humedecimiento-secado o congelamiento-deshielo, golpe de la gota de lluvia, tracción de una corriente eólica o hídrica, fricción o empuje de barro o hielo, o fragmentación a consecuencia de la caída libre por gravedad). Resulta de ello un material suelto, cuya cohesión interna es inferior al material de entrada y más susceptible a ser transportado. Con frecuencia el proceso de separación es selectivo y el material suelto o disuelto, difiere en su composición y granulometría del suelo, regolito, biomasa o sedimento inicial. El material suelto resultante no siempre es transportado y, ocasionalmente, puede quedar acumulado en la superficie del suelo, del regolito, del sedimento o de la biomasa.

El transporte puede ser realizado por varios agentes o fuerzas, entre las que se encuentran algunas de las requeridas para la separación, aunque, en general, se necesita menor esfuerzo para transportar un determinado material suelto que para desprenderlo y ponerlo en movimiento. La mayor parte de los agentes disponen de la energía potencial gravitatoria, la que, como expresa la aproximación (1) siguiente, depende de la diferencia de altura entre el punto de

partida y el de llegada (desnivel), al desplazarse un cuerpo de masa  $m$  desde una altura  $h_1$  hasta una altura  $h_2$ :

$$\Delta V_G \approx mg (h_2 - h_1) \quad (1)$$

donde  $\Delta V_G$  es la variación de la energía gravitacional potencial y  $g$  es la aceleración de la gravedad sobre la superficie de la Tierra.

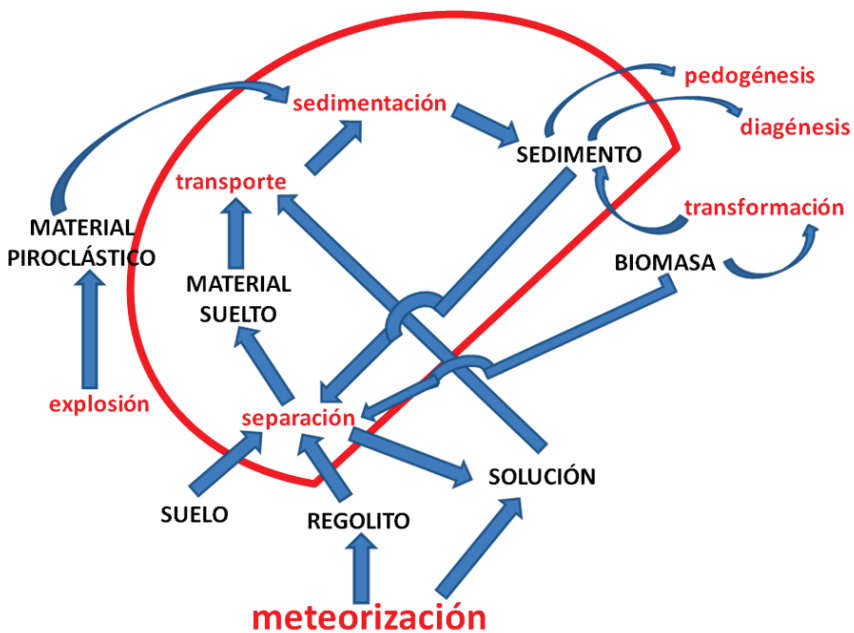
Otra energía es la solar, que participa en los cambios de presión atmosférica, que se transforman en energía eólica.<sup>13</sup>

El agente de transporte de los materiales disueltos, es la misma solución acuosa que produjo su separación, mientras que los agentes de transporte más comunes de los materiales sólidos son el aire (viento), aguas de escorrentía difusa, corrientes fluviales, corrientes marinas (litorales o profundas), hielo (glaciares), barros resultantes de mezclas con distintas proporciones de agua y detritos. Ellos se caracterizan por su competencia, por su capacidad para seleccionar los materiales que son transportados de acuerdo a su peso y movilizarlos por diferentes mecanismos (solución, flotación, saltación, arrastre, etc.), y por su capacidad para facilitar el desgaste de las partículas. Muchas de las características del transporte provienen de la fluidez del medio; por ejemplo, un medio muy fluido como el viento, tiene una competencia limitada, comparada con el agua, el barro o el hielo, pero es altamente eficiente para seleccionar y redondear las partículas transportadas; contrariamente, una masa de barro viscoso en movimiento, puede tener competencia como para movilizar bloques rocosos de varias toneladas, pero no es adecuada para separar las partículas más finas de las más gruesas que acarrea, ni para permitir colisiones libres entre los bloques o la abrasión de éstos por las partículas arenosas.

El transporte en solución finaliza cuando la capacidad del agente para mantener las sustancias disueltas disminuye debido a cambios en las condiciones físicoquímicas del medio, lo cual conduce a la precipitación química de compuestos similares a los inicialmente disueltos o de nuevos compuestos insolubles en las nuevas condiciones, resultantes de combinaciones entre los componentes de la solución. Otro mecanismo es la captación de las sustancias disueltas por los organismos y su incorporación a la biomasa, como se verá en el ciclo biogeoquímico. En el caso del transporte de materiales sólidos, el mismo concluye cuando la fuerza del agente disminuye por debajo de ciertos valores críticos, el material es depositado y se transforma en un sedimento, dando término a la erosión. Esta disminución de la fuerza puede ser el resultado de un cambio de velocidad del agente (por cambio de pendiente, aumento de la

fricción con el fondo y lateral, incremento de la viscosidad, etc.), o por exceso de carga (incremento del rozamiento interno y choques entre partículas, incremento de la viscosidad de la mezcla agente de transporte-material transportado, etc.).<sup>□</sup>

El sedimento resultante de la erosión (separación y transporte) y sedimentación, hereda algunas características del material inicial, pero durante las diferentes etapas adquiere otras, por lo cual en general, es un material nuevo. El sedimento puede ser afectado por tres procesos: pedogénesis, diagénesis o separación. En este último caso, se cierra el ciclo de erosión y se reinicia uno nuevo, lo cual puede ocurrir numerosas veces. En los otros casos los sedimentos ingresan a la secuencia pedogenética o al ciclo sedimentario, respectivamente.



**Figura 2:** Ciclo de erosión - sedimentación de la fase superficial del ciclo geológico.

### 3.3. Ciclo biogeoquímico

El ciclo biogeoquímico contempla la actividad biológica que ocurre en la biósfera, la cual, interactuando con la litósfera (las rocas), la pedósfera (el suelo), la hidrósfera (soluciones acuosas más o menos diluidas) y la atmósfera, produce una biomasa que se va acumulando en una mezcla compuesta de cuerpos vivos y muertos de vegetales y animales, macro y microscópicos. Este ciclo abarca muy diversos ambientes: ocurre sobre y dentro del suelo, en cuerpos de agua

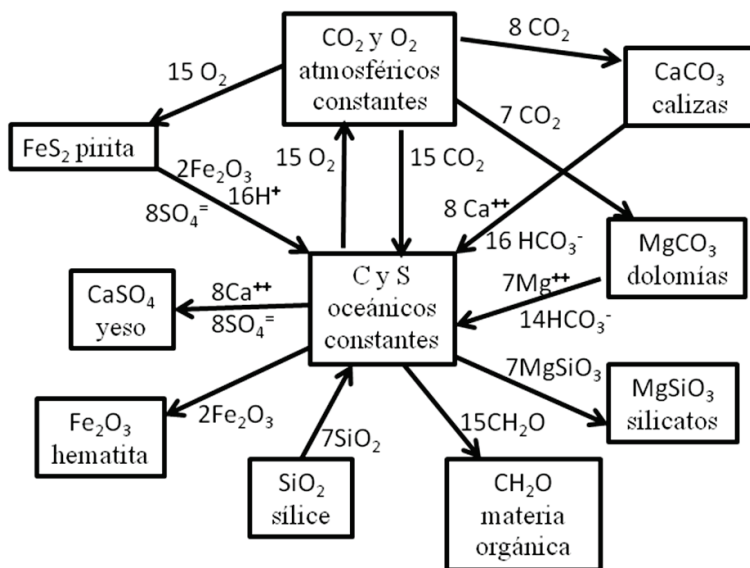
continentales (pantanos, lagos y lagunas), o en cuencas sedimentarias marinas; frecuentemente abarca varios de estos ambientes simultáneamente. Por lo tanto, la acumulación de biomasa puede ocurrir en diversos ámbitos, según sea el emplazamiento de la actividad biológica que le ha dado origen. De acuerdo a ello cambia la naturaleza o composición de la biomasa. En los suelos se trata fundamentalmente de restos vegetales, mezclados con la macro y microbiota propia de ese ambiente, sus restos muertos y sus excreciones; en los pantanos también se trata de restos vegetales mezclados con la macro y microbiota que corresponde a ese ambiente, sus restos muertos y sus excreciones, pero es de hacer notar que la naturaleza de la vegetación y la tasa de acumulación es distinta a la del ambiente edáfico típico, así como frecuentemente también es diferente el ambiente fisicoquímico; sin embargo, globalmente en ambos ambientes su composición mayoritaria puede ser representada esquemáticamente por la fórmula  $\text{CH}_2\text{O}$  asociada a diversas formas de N. En los lagos, lagunas y mares, la acumulación corresponde a exoesqueletos de diatomeas, radiolarios, espongiarios y moluscos, así como restos de esqueletos de vertebrados; de acuerdo a ello la composición global se basa en la abundancia de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ .

Además, son muy pocas las reacciones químicas que ocurren sobre la superficie de la Tierra que no estén afectadas por la actividad biológica, este ciclo engloba reacciones químicas que afectan no sólo a los seres vivos, sino también a la atmósfera, la hidrósfera, la pedósfera y la litósfera (Schlesinger, 2000).

El ciclo biogeoquímico constituye una de las etapas de la recirculación de una parte importante de los elementos químicos, principalmente de los 30 primeros de la tabla periódica, que son los más abundantes con la excepción del Li, Be, B y Sc, y comprenden desde el hidrógeno hasta el cinc. Estos 26 elementos abundantes son componentes importantes de la biomasa, pero no sólo se encuentran en la biósfera, sino que constituyen también las demás capas, desde la atmósfera hasta la litósfera. El papel fundamental del ciclo biogeoquímico es controlar, dentro del ciclo geológico, la constante transferencia de elementos entre ellas. Estos aspectos son expuestos claramente por Schlesinger (2000: 12 y siguientes), de quien se ha tomado como ejemplo la Figura 3, basada en Garrels y Lerman (1981) y Garrels y Perry (1974). Allí se distinguen los compartimientos de la atmósfera (dióxido de carbono y oxígeno), la hidrósfera representada por el carbono y el azufre total de los océanos, la litósfera expresada por diversos minerales y rocas, y la biósfera identificada con la materia orgánica expuesta como carbohidrato ( $\text{CH}_2\text{O}$ ). El modelo se basa en el supuesto de que la composición de la atmósfera y los océanos se ha mantenido casi constante en los últimos 60 millones de años respecto a los elementos allí

señalados y tomando como referencia la producción de 15 moles de materia orgánica. Se deduce del modelo que si, por ejemplo, el C oceánico es capturado por la materia orgánica, para que su cantidad no varíe (como se supone que ha ocurrido desde el inicio del Cenozoico), debe ser repuesto por la descomposición de los carbonatos, lo cual a su vez libera  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ , lo cual debería promover la formación de yeso y silicato de magnesio (enstatita), pero ello requiere Si y S que serán proporcionados por la meteorización de silicatos y pirita.

La biomasa acumulada, ya sea sobre el suelo, en el fondo de un pantano, o donde le corresponda, sufre transformaciones in situ, generalmente resultantes de la actividad de algunos seres vivos sobre los restos muertos y excretas de su misma especie o de otras, dando lugar a la acumulación de los sedimentos orgánicos no transportados, o sufre pedogénesis o, luego de transformada, ingresa en nuevas etapas de actividad biológica, como ocurre frecuentemente en forma iterativa (figura 4). Ejemplos de los sedimentos orgánicos no transportados son la turba<sup>15 16</sup>, los arrecifes coralinos<sup>17 18</sup> y las acumulaciones de guano<sup>19</sup>. Cuando sufre pedogénesis se transforma en las sustancias húmicas que caracterizan principalmente a los horizontes superiores del suelo y se mezcla con cantidades variables de materiales minerales.

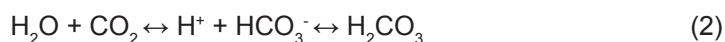


**Figura 3.** Ejemplo de modelo biogeoquímico que contempla el equilibrio entre componentes atmosféricos y oceánicos constantes y la producción de materia orgánica. Tomado de Schlesinger (2000), basado en Garrels y Lerman (1981) y Garrels y Perry (1974).

Como alternativa, la biomasa puede ser sometida a separación y ser eventualmente transportada (erosionada), hasta llegar a formar parte de una acumulación sedimentaria, pero en este caso a través del ciclo de erosión-sedimentación, cuyos aspectos más generales han sido mencionados.

Por lo expuesto anteriormente el ciclo biogeoquímico forma parte del ciclo sedimentario. Hay numerosos ejemplos de sedimentos orgánicos provenientes de la erosión de sedimentos previos transformados o no, pero entre los más característicos se encuentran las arenas calcáreas provenientes de la erosión de arrecifes coralinos, o los depósitos de diatomeas de los fondos oceánicos. Con frecuencia los materiales removidos de las acumulaciones de biomasa se mezclan con materiales provenientes de otras fuentes, dando lugar a sedimentos mixtos, parcialmente minerales y parcialmente orgánicos.

El ciclo biogeoquímico es uno de los mejores ejemplos de la interacción entre la litósfera, la hidrósfera, la pedósfera, la atmósfera y la biósfera (Figuras 3 y 4). Cabe resaltar que los organismos del suelo ejercen un control sobre el tenor de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera del suelo, con lo cual influyen sobre la tasa de meteorización de los minerales del suelo, de sus materiales parentales y de las rocas subyacentes, por medio de la reacción con el agua para formar ácido carbónico, según la ecuación siguiente (Schlesinger, 2000):



Pero además, a través de la reacción anterior y de la fotosíntesis, también se controla el tenor de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, con el conocido efecto que el mismo tiene en la regulación climática.

Por otra parte, las transformaciones de la biomasa engloban la formación, entre otros muchos compuestos orgánicos, de ácidos sencillos como el acético, cítrico u oxálico, o más complejos como los fúlvicos y húmicos, que por su carácter ácido y quelatante, también participan activamente en la meteorización de los minerales. Como muestran las figuras 1 y 5, la meteorización es una secuencia que forma parte del ciclo sedimentario y a partir de la cual se obtienen productos sólidos (regolitos), que van a constituir materiales parentales de suelos o serán origen de nuevos sedimentos, así como productos líquidos (soluciones) que se van a incorporar tanto a nuevas etapas del ciclo biogeoquímico, como a la formación de sedimentos por precipitación de las sustancias disueltas o participan en la pedogénesis.

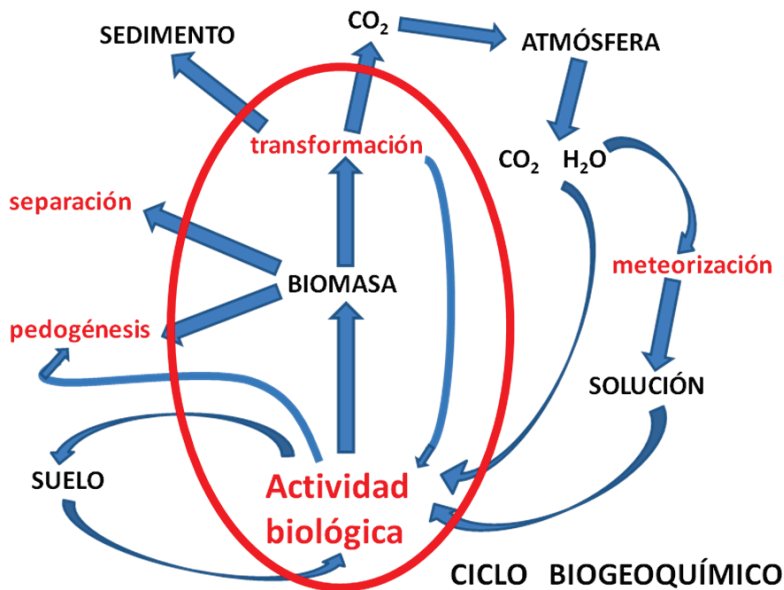


Figura 4: Ciclo biogeoquímico de la fase superficial del ciclo geológico.

### 3.4. Ciclo sedimentario

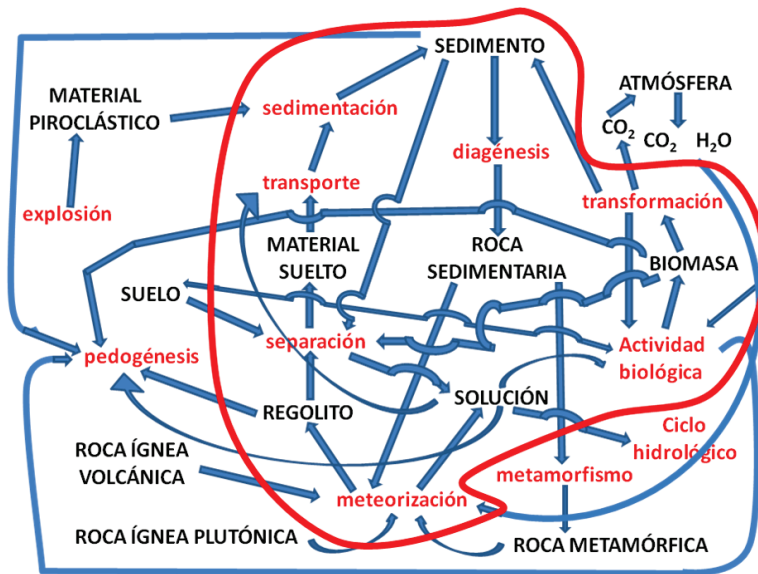
El ciclo sedimentario, también denominado litogénesis exógena, incluye al ciclo de erosión-sedimentación, la secuencia de meteorización y el ciclo biogeoquímico, pero es más amplio que la suma de ellos (Figura 5). Se caracteriza porque los sedimentos se acumulan y sufren transformaciones postsedimentarias denominadas diagénesis y litificación, consistentes esencialmente en la compactación, pérdida de agua, concentración de las sales en las aguas connatas en los poros y grietas, cementación y recristalización, pero también formación de nuevos minerales (que con frecuencia actúan como pigmentos) en equilibrio con el ambiente en el que se encuentra el sedimento. Ello determina la transformación del sedimento en un material consolidado: roca sedimentaria (de ahí el nombre de *litogénesis*). Esta roca sedimentaria puede meteorizarse y seguir en la fase superficial del ciclo, o pasar a la fase profunda y metamorfizarse. Si se meteoriza, sigue la secuencia correspondiente y entra nuevamente a otra vuelta del ciclo de erosión-sedimentación ya descrito.

Un componente importante del ciclo sedimentario es la biomasa, integrante del ciclo biogeoquímico. Como ya se explicó, la misma puede transformarse in situ y dar lugar total o parcialmente, a un sedimento no transportado, o sufrir separación de algunos (o todos) de sus componentes e ingresar al ciclo de erosión-sedimentación. Otro destino de la biomasa es ser directamente afectada

por la pedogénesis y participar en la constitución del suelo, estableciendo la conexión entre el ciclo sedimentario y la secuencia pedogenética.

Finalmente, otro ingreso al ciclo sedimentario corresponde a los materiales piroclásticos provenientes de explosiones volcánicas, que se acumulan por caída libre en las adyacencias del aparato volcánico cuando son gruesos, o caída diferida luego de ser transportados por el viento a distancias considerables, si son finos (cenizas).

El ciclo sedimentario permite la recirculación de la materia a través de reiteradas repeticiones o su ingreso a otras secuencias y ciclos. Esto es lo que ocurre si los sedimentos y los regolitos son sometidos a la pedogénesis, o las rocas sedimentarias a metamorfismo o las soluciones pasan a otros compartimientos del ciclo hidrológico. En este ciclo, muy complejo, puede establecerse una diversidad de sub ciclos que enlazan la litósfera con la biósfera, la hidrósfera y la atmósfera<sup>20</sup>.



**Figura 5:** Ciclo sedimentario o de Litogénesis exógena, que ocurre en la fase superficial del ciclo geológico.

### 3.5. Secuencia volcánica

Otra secuencia que se distingue en la fase superficial del ciclo geológico es la volcánica. Se inicia con el proceso de erupción, por medio del cual el magma formado en la fase profunda del ciclo, emerge a la superficie y se transforma en lava. Se trata, entonces, de uno de los enlaces entre ambas fases del ciclo.

Debido a la liberación de la presión y la pérdida de calor al contacto con la atmósfera, la lava se solidifica y cristaliza dando lugar a las rocas ígneas volcánicas. Éstas pueden mantenerse en superficie y ser meteorizadas o reingresar a la fase profunda y metamorfizarse.

Con frecuencia la erupción no sólo contempla la emersión de la lava, sino explosiones que fragmentan los materiales sólidos del entorno y asperjan las fracciones líquidas que se evaporan o solidifican en el aire. Estos productos (materiales piroclásticos y gases) al depositarse en caída libre o ser transportados por el viento, constituyen sedimentos volcánicos que acompañan a las rocas ígneas volcánicas y establecen el enlace entre la secuencia volcánica con el ciclo sedimentario (figura 6).

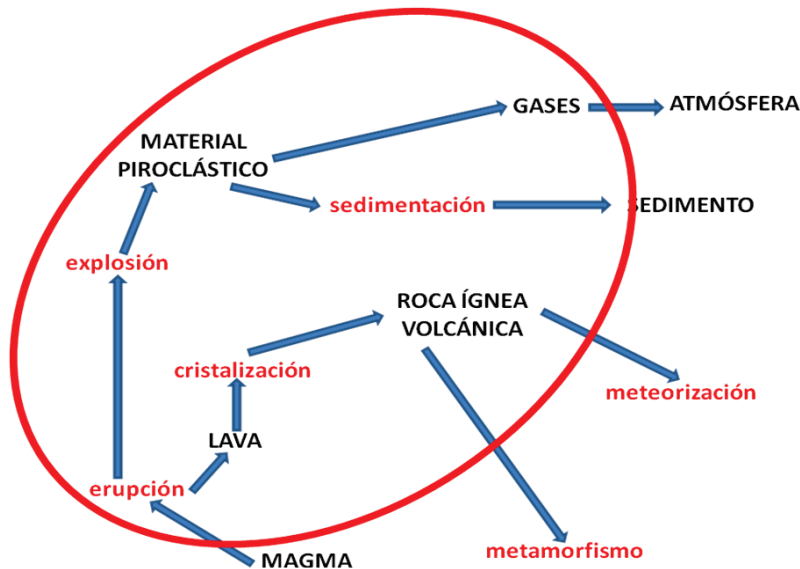


Figura 6: Secuencia volcánica.

### 3.6. Secuencia pedogenética

Cuando los sedimentos y los regolitos son sometidos a pedogénesis, con la participación de soluciones acuosas y de parte de la biomasa proveniente de la actividad biológica, se da lugar a la formación del suelo a través de la secuencia pedogenética (figura 7). Para que la pedogénesis pueda desarrollarse los materiales deben tener ciertas características que se encuentran juntas sólo en los regolitos y en los sedimentos: porosidad para almacenar y renovar agua y aire y ponerlos en íntimo contacto con los componentes sólidos y a disposición de la biota, disponibilidad de nutrientes para ésta, rangos de temperatura y presión

compatibles con la vida, contacto con la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera. Ello significa que ambos (sedimentos y regolitos) actúan como los únicos materiales parentales de los suelos, dando inicio a la secuencia pedogenética.

Como todos los otros procesos que ocurren dentro del ciclo geológico, el proceso de pedogénesis es muy complejo y se compone de numerosos subprocesos (Casanova, 2005; Porta et al., 1999). Ellos conducen a la transformación de los materiales parentales, al ingreso de nuevos materiales, a la pérdida de otros, o a la traslocación de algunos desde la parte superior hacia la inferior o vice-versa, todo lo cual requiere de la interacción de los materiales parentales con la biota, los gases de la atmósfera y las soluciones de la hidrósfera, dando lugar a numerosas reacciones como las mencionadas al tratar el ciclo biogeoquímico. Para que ello ocurra los materiales parentales deben tener las características señaladas más arriba. Como resultado los materiales expuestos al efecto acumulado de esos procesos adquieren nuevas propiedades: entre las primeras, el color cambia respecto al del material parental (casi siempre debido a la acumulación de cantidades relativamente pequeñas de humus y oxihidróxidos de hierro) y se desarrolla una nueva estructura basada en la agregación de los componentes minerales y orgánicos (agregados del suelo).

Como esos cambios tienen distintas intensidades según la profundidad, resulta otro tipo de cambio estructural respecto al material parental: una diferenciación de capas de distintas propiedades (horizontes pedogenéticos). Por otra parte, esas transformaciones requieren de cierto tiempo y son acompañadas y seguidas por muchas otras. Además pueden desarrollarse sobre ciertos materiales de manera más rápida que sobre otros según las condiciones ambientales, por lo cual, las nuevas propiedades que se han llevado a cabo a expensas de los materiales parentales y que definen el nuevo cuerpo denominado "suelo", pueden manifestarse desde manera apenas apreciable, hasta exponerse de manera muy evidente y contrastada respecto a los atributos del material de origen. Por ello, un suelo bien desarrollado se diferencia claramente de sus materiales parentales debido a que ha adquirido una gran cantidad de atributos propios. Pero un suelo incipiente, en el cual recién apenas comienzan a manifestarse los efectos de la pedogénesis, se distingue de un regolito no suelo o de un sedimento no suelo, por sus funciones: tiene aptitud para proporcionar a las plantas el soporte mecánico, así como el agua, aire y nutrientes que necesitan para su nacimiento, desarrollo y reproducción, como se ha definido en el cuadro 2.

En general, la porción de sedimentos y regolitos modificada por la pedogénesis puede ser de sólo algunos centímetros y rara vez alcanza unos pocos metros. De allí que la pedósfera se comporte como una delgada capa (cuadro 1), una "epidermis" muy delgada, que actúa como el espacio de interacción donde

se desarrollan los intercambios entre las otras capas esféricas concéntricas de los distintos componentes externos de la Tierra, que es discontinua porque sólo se desarrolla donde existan regolitos o sedimentos en contacto con la atmósfera, la biósfera y la hidrósfera.

Para que esta secuencia se pueda desarrollar, los sedimentos no deben ser erosionados ni diagenetizados, y los regolitos no deben ser erosionados. Es decir debe alcanzarse un equilibrio o estabilidad que impida el enterramiento de los sedimentos por acumulaciones posteriores (lo que los alejaría de la superficie y propiciaría la diagénesis), a la vez que disminuya la intensidad de la erosión de sedimentos y regolitos. Ambas condiciones corresponden con una disminución de la intensidad del ciclo sedimentario. Es decir que este ciclo y la secuencia pedogenética tienen efectos contrapuestos. Una concepción similar fue desarrollada hace bastante tiempo por Erhart (1967), al exponer su teoría geológica y geoquímica que fundamenta las nociones de biostasia y rexistasia.

La ubicación de la secuencia pedogenética en el ciclo geológico es esencial para completar la fase superficial, porque establece otra vía de ingreso al ciclo sedimentario, cuando los suelos son erosionados. A su vez, los suelos al cumplir su papel esencial en la fase superficial del ciclo geológico, permiten el desarrollo de la actividad biológica, que aglutina una gran cantidad de procesos que son la esencia del ciclo biogeoquímico ya mencionado. A su vez, la actividad biológica es tan esencial para la pedogénesis, que ésta no puede realizarse en ausencia de la otra.

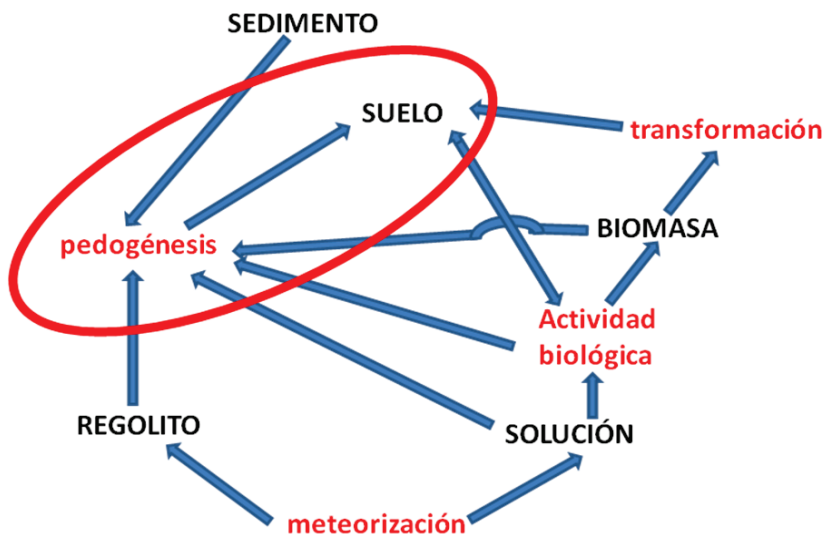


Figura 7: Secuencia pedogenética, como parte de la fase superficial del ciclo geológico.

#### 4. Discusión

El ciclo geológico que se propone, resulta entonces del enlace secuencial de los diferentes materiales con los procesos, en sus fases superficial y profunda (figura 8). La exposición anterior se centra en la fase superficial. La fase profunda está compuesta por su parte de los ciclos magmático y metamórfico así como la secuencia de anatexis, cuyas descripciones no corresponden al objetivo de este trabajo.

La descripción del ciclo geológico que antecede corresponde específicamente a un grado de detalle intermedio, pero el ciclo es un modelo que se presta para ser expuesto con distintos grados. Cada uno de sus componentes y procesos, ya sea aislado o integrado en alguna de las secuencias y ciclos descritos, puede ser estudiado con mayor o menor detalle y profundidad, según se desee. En ese caso el ciclo tal como ha sido expuesto, siempre servirá de referencia general y permitirá mantener la estructura y las relaciones entre los distintos niveles de la profundización. Esa característica determina que sea una herramienta de utilidad para la investigación y la enseñanza de las Ciencias de la Tierra con un enfoque holístico y sistémico, principalmente para aquellos materiales y procesos que caracterizan la fase superficial, entre los cuales, a diferencia con otras propuestas de ciclos geológicos, se incluye a los suelos como parte de los productos resultantes de la evolución de la Tierra. También se destaca la inserción del ciclo biogeoquímico en el ciclo sedimentario, como un enlace fundamental entre la biósfera y la pedósfera con la litósfera, fundamentalmente las rocas sedimentarias. Resulta evidente que esta concepción del ciclo geológico se basa en que todos sus componentes interactúan entre sí, a veces porque están directamente relacionados y en otros casos, porque forman parte de los mismos ciclos.

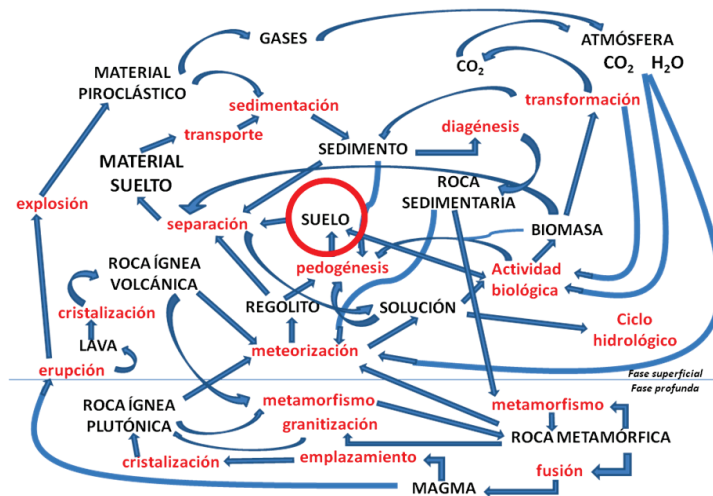


Figura 8: Ciclo geológico.

Las secuencias y ciclos anteriores, que muestran las relaciones entre los materiales y los procesos en los que intervienen, se desarrollan en la fase superficial del ciclo a expensas de los aportes de materia y de energía que están determinados por un conjunto de factores complejos que son comunes a todos ellos:

- Materiales de origen o parentales
- Condiciones del relieve
- Condiciones del clima
- Características de la biota
- Tiempo de evolución
- Actividades humanas

Los atributos y el estado (como condición física, química y fisicoquímica) de los materiales que forman parte de la fase superficial del ciclo geológico: rocas sedimentarias, sedimentos, regolitos, materiales sueltos in situ, suelos, biomasa y rocas ígneas volcánicas, y de las soluciones acuosas que interactúan con ellos, considerados ya sea como sistemas independientes o como parte de un solo macrosistema muy complejo, son una función de la interacción de los factores anteriores, la cual puede ser expresada, imitando la propuesta de Jenny (1941-1994), por la ecuación siguiente:

$$\mathbf{mslfscg} = \mathbf{f}(\mathbf{mo,cl,r,b,t,h}) \quad (3)$$

Donde **mslfscg** significa **m**ateriales **s**ólidos y **l**íquidos de la **f**ase **s**uperficial del **c**iclo **g**eológico, cuyas características son función de la interacción de: **mo** = material de origen; **cl** = condiciones del clima; **r** = condiciones del relieve; **b** = características de la biota; **t** = tiempo de evolución e interacción de los otros factores; **h** = actividades humanas.

Resulta relativamente fácil, a partir de las descripciones expuestas, reunir elementos que prueben cualitativamente que la ecuación anterior es una aproximación correcta. Solamente la inferencia no es tan directa para el caso de las rocas ígneas volcánicas. En ese caso, es evidente que muchas de sus propiedades están determinadas por las características del magma inicial y su cristalización extremadamente rápida, pero no hay una relación inmediata con el clima, la biota y el relieve. Según la figura 6, la secuencia volcánica tiene tres salidas: hacia los sedimentos volcánicos, el metamorfismo y la meteorización. La

posibilidad que siga cualquiera de los dos primeros caminos no depende de los factores externos como el clima, la biota o el relieve; pero el que la roca ígnea volcánica pueda mantenerse con sus atributos propios o ser transformada en regolito por la meteorización, seguramente dependerá de la acción de elementos relacionados con esos tres factores.

Respecto al agua como componente líquido de la fase superficial del ciclo geológico, ella participa en muchos de los procesos de todos los ciclos y secuencias descritas, y sus propiedades, no como agua químicamente pura, sino como solución, van cambiando en la medida que esos procesos transcurren. Son precisamente esos cambios los que favorecen o limitan el desarrollo de los procesos en los que interviene.

Es de hacer notar que la ecuación (3), se ha formulado a nivel de los materiales que coexisten en la superficie de la tierra, lo cual expresa que los atributos que caracterizan a esos materiales, trascienden mas allá de las secuencias o ciclos que los vinculan a los distintos procesos en los que participan, cuya naturaleza, intensidad y oportunidad de ocurrencia, dependen finalmente de las propiedades de esos materiales, que resultan de la interacción de los factores allí indicados.

El ámbito físico donde se desarrolla la fase superficial del ciclo geológico definido, es decir donde interactúan las rocas, los sedimentos, los regolitos, los materiales sueltos in situ, los suelos, con los componentes de la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera (incluyendo al hombre), en definitiva puede ser definido como un sistema: el ecosistema.

El ciclo geológico es multitemporal, es decir que durante su desarrollo completo, cada uno de los procesos complejos que se han señalado y cada uno de los procesos específicos en los que ellos se subdividen, se desarrollan a velocidades que les son propias y diferentes entre sí, e incluso, son diferentes para el mismo tipo de proceso si cambian las condiciones ambientales y las características de los materiales involucrados, determinadas por la interacción de los factores señalados en la ecuación (3). En un momento dado de la historia de la Tierra (en el momento actual, o hace mil o un millón de años, o cualquier otro), se desarrollan (o se desarrollaron) al mismo tiempo procesos muy rápidos, rápidos, moderados, lentos y muy lentos, que se asocian y concatenan en secuencias y ciclos como los ya definidos. De manera que para apreciar la evolución conjunta de todos ellos, hablando metafóricamente, habría que recurrir a un cronómetro que permitiera medir décimas de segundo, segundos, minutos, horas, días, semanas, meses, años, siglos, milenios, períodos geológicos. De

manera que mientras que una parte del cronómetro indica que ha pasado una hora, la que registra las décimas de segundo computa 36.000 unidades.

Para que un elemento, por ejemplo calcio, que se encuentre en las plagioclasas de una roca ígnea plutónica que emerge de la fase profunda y es expuesta a la meteorización, recorra las distintas instancias de la fase superficial (secuencias y ciclos) que lo lleven nuevamente a ingresar en la fase profunda como roca sedimentaria (en forma de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ , o en los remanentes de las plagioclasas originales que no se alteraron, u otras de las tantas formas posibles) y se transforme en una roca metamórfica donde el calcio se mantenga como carbonato o fosfato o pase a formar silicatos, se estima que deben transcurrir un lapso de 200 o 250 millones de años. En ese ínterin, el Ca contenido en la plagioclasa debe pasar, generalmente de manera iterativa, de un material a otro (regolito, suelo, sedimento, biomasa, material suelto, roca sedimentaria, soluciones), a través de los diversos procesos que caracterizan a los ciclos y secuencias definidos. El tiempo que permanece el calcio en cada uno de esos materiales o durante el cual es afectado por los distintos procesos antes de proseguir, es muy variable y no hay muchas referencias a las que recurrir (cuadro IV) y puede ser tan breve como lapsos estimados entre 1 y 10 años cuando se trata de la retención del calcio solubilizado por los coloides del suelo y su absorción por la biota para formar biomasa, o más extenso pero muy variable (estimado entre 100 y 600.000 años) si se trata de su persistencia en el mineral primario. Pero se estima en más extenso aún el tiempo en que permanece capturado en un sedimento en proceso de diagénesis y transformándose en roca sedimentaria (500.000 a 2.000.000 de años). Esta roca sedimentaria puede ser expuesta a meteorización, reiniciando los pasos, pero probablemente siguiendo un orden diferente de ocurrencia, o puede ser tomada por procesos de subducción y reingresar a la fase profunda, donde se metamorfizará, cerrando el recorrido del calcio. En esta última etapa el Ca retenido en la roca sedimentaria permanece sin cambios significativos de ubicación durante varias decenas de millones de años.

Los lapsos indicados en el texto y en el Cuadro 4 son estimaciones muy gruesas propuestas como ejemplo, que de ninguna manera deben ser tomadas como valores ciertos y absolutos, pero son útiles para reconocer que para completar el recorrido de la fase superficial del ciclo geológico, todos los ciclos que allí coexisten deben repetirse iterativamente numerosas veces.

**Cuadro 4:** Tiempo de permanencia estimado en cada uno de los procesos para el Ca proveniente de una plagioclasa, para que pueda completar la fase superficial del ciclo geológico

PROCESO	TIEMPO DE PERMANENCIA RAZONABLE EN AÑOS
Roca ígnea plutónica con plagioclasa cálcica expuesta a la meteorización	10.000.000 - 1.000.000.000
Parte de la plagioclasa se altera y el Ca es liberado a la solución y pasa al ciclo hidrológico	100 - 600.000
Parte del Ca en solución es retenido como intercambiable por coloides del regolito	1 – 100
Parte del Ca en solución es transportado y sedimentado por precipitación	1 – 100
Ca en plagioclasa no alterada forma el regolito	100 - 600.000
Parte del regolito con plagioclasa no alterada se erosiona y se sedimenta	10 – 500
Parte del regolito con plagioclasa no alterada se transforma en suelo	500 – 1.000
Parte de la plagioclasa heredada por el suelo del regolito se altera y libera Ca a la solución y parte de éste pasa al ciclo hidrológico	100 – 300.000
Parte del Ca en solución es retenido como intercambiable por coloides del suelo	1 – 10
Parte del Ca en solución es transportado y sedimentado por precipitación	1 – 100
Parte del suelo con plagioclasa no alterada y Ca intercambiable se erosiona y se sedimenta	1 – 250
Parte del Ca en solución es tomado por la biota y forma biomasa	1 – 100
El Ca intercambiable en el suelo es tomado por la biota y forma biomasa	1 – 10
Parte de la biomasa con Ca es transformada y se acumula como sedimento no transportado	1 – 1.000
Parte de la biomasa con Ca es erosionada y se sedimenta sin liberar el Ca	1 – 1.000
Parte del sedimento con Ca en forma mineral u orgánica se erosiona	1 – 500
Parte del sedimento con Ca se transforma en suelo	500 – 1.000
Parte del sedimento con Ca precipitado u orgánico sufre diagénesis y transforma en roca sedimentaria con Ca	500.000 – 2.000.000
Parte de la roca sedimentaria con Ca en forma de plagioclasa heredada y de minerales neoformados por precipitación química y de minerales de origen orgánico se meteoriza	100 – 1.000
Parte de la roca sedimentaria con Ca se profundiza, sale de la fase superficial del ciclo y se metamorfiza, se sintetiza nuevamente plagioclasa cálcica	10.000.000 - 1.000.000.000

## 5. Conclusiones

La Tierra presenta una estructura compuesta de una serie de capas esféricas concéntricas, cada una de las cuales tiene composición y estructura definidas y es escenario de un conjunto de procesos complejos característicos. Para su estudio los científicos han desarrollado distintas ramas especializadas del conocimiento, de manera que los climatólogos se ocupan de la atmósfera, los hidrólogos de la hidrósfera, los biólogos de la biósfera, los pedólogos de la pedósfera y así sucesivamente. Sin embargo, los límites entre esas esferas distan mucho de ser netos e impermeables a los flujos de masa y energía y con frecuencia los procesos que ocurren en uno de esos ambientes dependen de (o influyen sobre) procesos que se desarrollan en algunos de los otros, por lo que se presentan varias opciones respecto a la forma como se muestra la relación entre los distintos componentes de la Tierra. Ello es particularmente importante en el caso del suelo, debido a su ubicación en el espacio donde interactúan la litósfera, la biósfera, la hidrósfera y la atmósfera. Debido a ello, en este trabajo se presenta una versión del ciclo geológico que incluye al suelo y se exponen los elementos que fundamentan las ventajas de tal enfoque. Por una parte, ello facilita la visión holística e interdisciplinaria de los procesos que ocurren en la superficie terrestre, sin perjudicar la identidad del objeto de estudio de la Ciencia del Suelo ni de ninguna de las otras ramas del conocimiento.

Además, se demuestra que el suelo resulta de la transformación, por medio de los procesos denominados pedogenéticos, de sedimentos y regolitos, los que a su vez son materiales que participan del ciclo sedimentario o de litogénesis. También se evidencia que el suelo es uno de los ingresos al ciclo de erosión – sedimentación, lo que permite comprender como los materiales que han sido capturados o inmovilizados en el suelo, vuelven a reintegrarse al citado ciclo, el cual es un circuito de gran importancia en la configuración de la superficie terrestre. Por otra parte, se pone de manifiesto que el suelo es una de las fuentes que alimenta la actividad biológica esencial en el ciclo biogeoquímico, contribuyendo a completar la circulación de la materia en las esferas superficiales del planeta. Finalmente se propone que las propiedades y el estado físico, químico y fisicoquímico de las rocas sedimentarias, sedimentos, regolitos, materiales sueltos in situ, suelos, biomasa y rocas ígneas volcánicas, así como las aguas superficiales, considerados ya sea como sistemas independientes o como parte de un solo macrosistema (ecosistema), son una función de la interacción de una amplia gama de factores relacionados con los materiales de origen, el clima, el relieve, la biota, el tiempo y las actividades humanas. Ello es en definitiva, lo que permite ver al suelo como uno de los cuerpos que resulta de la evolución de la Tierra con una participación activa en dicha evolución.

En síntesis, el ciclo geológico propuesto es un modelo que, como expresa Schlesinger (2000), refiriéndose al modelado en general, es una herramienta que ayuda a generalizar los resultados de mediciones a pequeña escala o experimentos de campo, para obtener estimaciones válidas a escala regional o global.

### **Agradecimientos**

El autor desea destacar que este ensayo pudo ser completado gracias a las oportunas e importantes correcciones y sugerencias de Mauveína Daza, Aníbal Rosales, Clara Rondón, Eladio Arias y Omar Rodríguez

### **Referencias Bibliográficas**

- BRION, J-C. (sf). [Documento en línea]. (2009) Le sol dans le cycle *géologique*. En: D'Argile et de Terres - IRD. Disponible: [http://www.ird.fr/fr/info/expo/atexpo/gf7\\_1.htm](http://www.ird.fr/fr/info/expo/atexpo/gf7_1.htm). [Consulta, septiembre 17]
- CASANOVA, E. (2005) Introducción a la Ciencia del Suelo. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 481 pág.
- DIXON y WEED (1989) Minerals in Soil Environments. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin. 2<sup>nd</sup> Ed. 1244 pag.
- ERHART, H. (1967) La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Esquisse d'une théorie géologique et géochimique: Biostasie et Rhexistasie 2<sup>a</sup> ed., Masson, Paris 165 pág.
- GARRELS, R. M. and PERRY Jr., E. A. (1974) Cycling of carbon, sulfur and oxygen through geologic time. In: Goldberb, E. (ed.), *The Sea, vol. 5, Marine Chemistry*, 303-336.
- GARRELS, R. M., and LERMAN, A., 1981, Phanerozoic cycles of sedimentary carbon and sulfur: National Academy Science Proceedings, v. 78, p. 4652-4656.
- GRIEM, W. y S. Griem-Klee (1999, 2007) [Documento en línea] Apuntes Geología General. Ciclo Geológico. Universidad de Atacama. Disponible: <http://www.geovirtual.cl/geologiageneral/geogenap.html>. [Consulta: Septiembre 17]
- JENNY, H. (1994) [Documento en línea]. (2009) Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology. Dover Publications, Inc. New York. Disponible: <http://www.soilandhealth.org/01aglibrary/010159.Jenny.pdf> [Consulta: Septiembre 17]
- MALAGÓN, D. (1979) Fundamentos de mineralogía de suelos: sus orígenes y aplicaciones. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Serie suelos y clima. Material de investigación; SC-36. 2 volúmenes.

PORTA, J, LOPEZ ACEVEDO, M y ROQUERO, C. (1999) Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 2ª Ed. 849 pág.

SCHLESINGER, W. H. (2000) Biogeoquímica. Un análisis del cambio global. Editorial Ariel, Barcelona, España. 580 pág.

**Notas:** \_\_\_\_\_

- 2 [http://images.google.co.ve/images?q=ciclo+geologico&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&ei=NaWASsf4EYaeMfngpf8C&sa=X&oi=image\\_result\\_group&ct=title&resnum=5](http://images.google.co.ve/images?q=ciclo+geologico&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&ei=NaWASsf4EYaeMfngpf8C&sa=X&oi=image_result_group&ct=title&resnum=5)
- 3 <http://gea.ciens.ucv.ve/slomonac/veranoguias/guiatema11ver08.pdf>
- 4 <http://es.wikipedia.org/wiki/Lava>
- 5 <http://en.wikipedia.org/wiki/Diagenesis>
- 6 [http://images.google.co.ve/images?q=metamorfismo&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&ei=LWd\\_StifBY-Ctqe\\_1NT6AQ&sa=X&oi=image\\_result\\_group&ct=title&resnum=4](http://images.google.co.ve/images?q=metamorfismo&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&ei=LWd_StifBY-Ctqe_1NT6AQ&sa=X&oi=image_result_group&ct=title&resnum=4)
- 7 [http://images.google.co.ve/imgres?imgurl=http://contenidos.educarex.es/cnice/biosfera/alumno/1bachillerato/petrogeneticos/imagenes/ima4/contact2.gif&imgrefurl=http://contenidos.educarex.es/cnice/biosfera/alumno/1bachillerato/petrogeneticos/contenido4.htm&usq=\\_\\_g6aMKm-O76jn67szSKpEHleQWos=&h=267&w=350&sz=33&hl=es&start=9&um=1&tbnid=IbiCFzVXocCCOM:&tbnh=92&tbnw=120&prev=/images%3Fq%3Dmetamorfismo%26hl%3Des%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:es-ES:official%26sa%3DX%26um%3D1](http://images.google.co.ve/imgres?imgurl=http://contenidos.educarex.es/cnice/biosfera/alumno/1bachillerato/petrogeneticos/imagenes/ima4/contact2.gif&imgrefurl=http://contenidos.educarex.es/cnice/biosfera/alumno/1bachillerato/petrogeneticos/contenido4.htm&usq=__g6aMKm-O76jn67szSKpEHleQWos=&h=267&w=350&sz=33&hl=es&start=9&um=1&tbnid=IbiCFzVXocCCOM:&tbnh=92&tbnw=120&prev=/images%3Fq%3Dmetamorfismo%26hl%3Des%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:es-ES:official%26sa%3DX%26um%3D1)
- 8 [http://ansatte.uit.no/kku000/webgeology/webgeology\\_files/spanish/magmatismo.html](http://ansatte.uit.no/kku000/webgeology/webgeology_files/spanish/magmatismo.html)
- 9 [http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/tema4\(1\).pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/tema4(1).pdf)
- 10 <http://www.gl.fcen.uba.ar/documentos/granitos.pdf>
- 11 [http://images.google.co.ve/images?q=ciclo+hidrologico&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&ei=rylaSsOWBsGHtgeLqKzdCg&sa=X&oi=image\\_result\\_group&ct=title&resnum=4](http://images.google.co.ve/images?q=ciclo+hidrologico&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&ei=rylaSsOWBsGHtgeLqKzdCg&sa=X&oi=image_result_group&ct=title&resnum=4)
- 12 [http://es.wikipedia.org/wiki/Erosi%C3%B3n\\_e%C3%B3lica](http://es.wikipedia.org/wiki/Erosi%C3%B3n_e%C3%B3lica)
- 13 <http://www.geovirtual.cl/geologiageneral/geogenap.html>

- 14 [http://images.google.co.ve/images?q=transporte+de+sedimentos&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&ei=kuaBStWnMYGANqzcoJgL&sa=X&oi=image\\_result\\_group&ct=title&resnum=4](http://images.google.co.ve/images?q=transporte+de+sedimentos&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&ei=kuaBStWnMYGANqzcoJgL&sa=X&oi=image_result_group&ct=title&resnum=4)
- 15 <http://es.wikipedia.org/wiki/Turba>
- 16 <http://www.geovirtual.cl/geologiageneral/ggcap05e-2.htm>
- 17 [http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi\\_rocas/calizacoralina.htm](http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/calizacoralina.htm)
- 18 [http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/casado/GEORED/Sedimentarias/organicas.htm](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/casado/GEORED/Sedimentarias/organicas.htm)
- 19 <http://es.wikipedia.org/wiki/Guano>
- 20 <http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope13/contents.html>