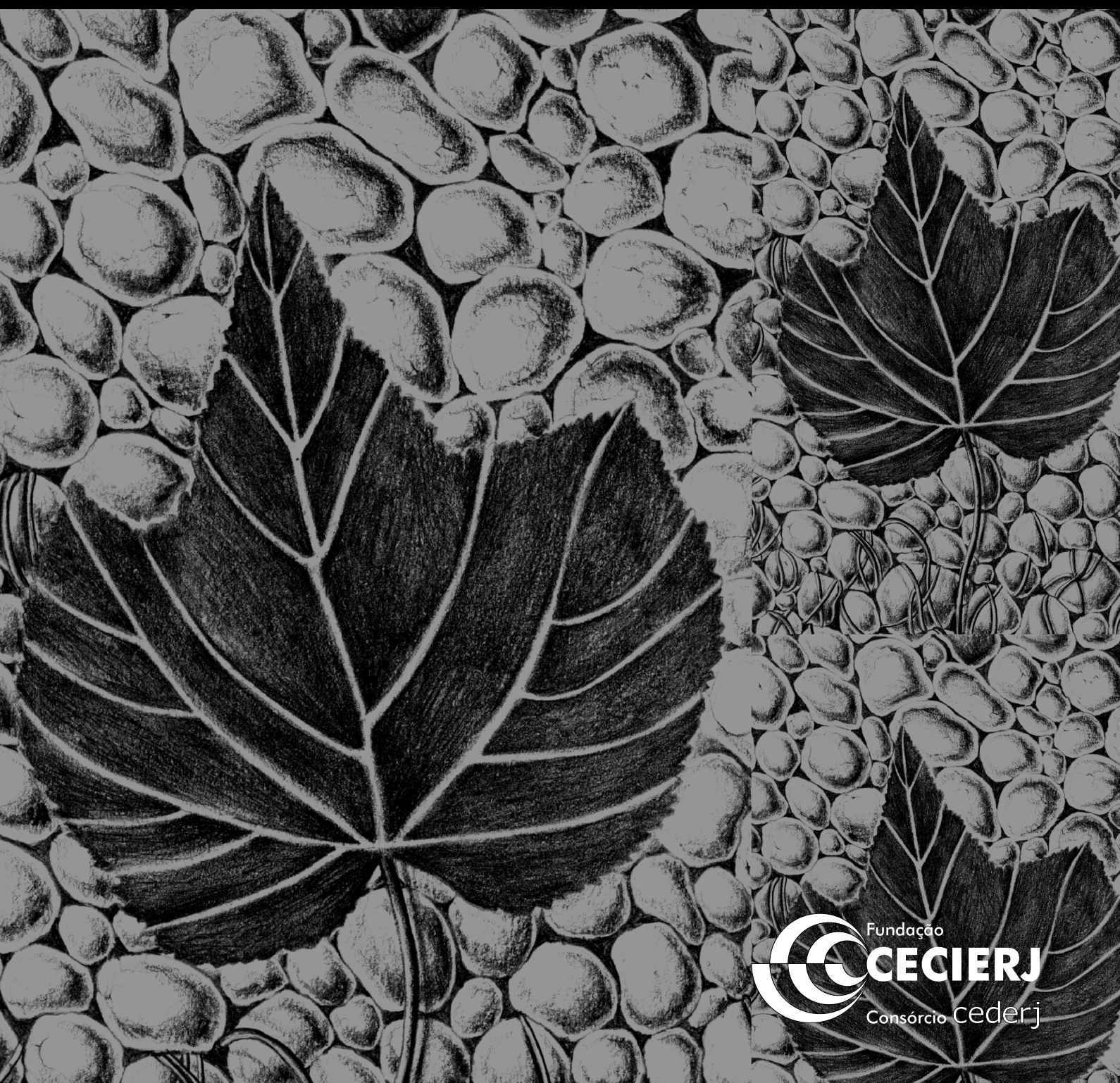


Módulos 1 a 6

Volume único

Álvaro Ramon C. Ovalle
Glaucia Torres Aragon

Dinâmica da Terra





Fundação

CECIERJ

Consórcio **cederj**

Centro de Educação Superior a Distância do Estado do Rio de Janeiro

Dinâmica da Terra

Volume único – Módulos 1 a 6

Álvaro Ramon C. Ovalle
Glauca Torres Aragon



**GOVERNO DO
Rio de Janeiro**

**SECRETARIA DE
CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

Ministério
da Educação



Apoio:



Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Rua Visconde de Niterói, 1364 – Mangueira – Rio de Janeiro, RJ – CEP 20943-001

Tel.: (21) 2299-4565 Fax: (21) 2568-0725

Presidente

Masako Oya Masuda

Vice-presidente

Mirian Crapez

Coordenação do Curso de Biologia

UENF - Milton Kanashiro

UFRJ - Ricardo Iglesias Rios

UERJ - Cíbele Schwanke

Material Didático

ELABORAÇÃO DE CONTEÚDO

Álvaro Ramon C. Ovalle

Glauca Torres Aragon

COORDENAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO INSTRUCIONAL

Cristine Costa Barreto

DESENVOLVIMENTO INSTRUCIONAL E REVISÃO

Leonardo Villela de Castro

Márcia Elisa Rendeiro

COORDENAÇÃO DE LINGUAGEM

Maria Angélica Alves

REVISÃO TÉCNICA

Marta Abdala

Departamento de Produção

EDITORA

Tereza Queiroz

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Jane Castellani

REVISÃO TIPOGRÁFICA

Alexandre Rodrigues Alves

Ana Tereza de Andrade

Gláucia Guarany

Jane Castellani

Marcia Pinheiro

COORDENAÇÃO DE PRODUÇÃO

Jorge Moura

PROGRAMAÇÃO VISUAL

Equipe CEDERJ

ILUSTRAÇÃO

Equipe CEDERJ

CAPA

Eduardo Bordoni

Fábio Muniz

PRODUÇÃO GRÁFICA

Andréa Dias Fiães

Fábio Rapello Alencar

Copyright © 2005, Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, da Fundação.

A659d

Aragon, Glauca Torres.

Dinâmica da terra. / Glauca Torres Aragon. – Rio de Janeiro : Fundação CECIERJ, 2008.

272p.; 19 x 26,5 cm.

ISBN: 85-7648-177-4

1. Geografia. 2. Ciclos biogeoquímicos. 3. Crosta terrestre. 4. Composição da terra. 5. Erosão. I. Ovalle, Álvaro Ramon C. II. Título.

CDD: 570

Governo do Estado do Rio de Janeiro

Governador
Sérgio Cabral Filho

Secretário de Estado de Ciência e Tecnologia
Alexandre Cardoso

Universidades Consorciadas

**UENF - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO
NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO**
Reitor: Almy Junior Cordeiro de Carvalho

**UERJ - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO**
Reitor: Ricardo Vieiralses

UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
Reitor: Roberto de Souza Salles

**UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO**
Reitor: Aloísio Teixeira

**UFRRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL
DO RIO DE JANEIRO**
Reitor: Ricardo Motta Miranda

**UNIRIO - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO
DO RIO DE JANEIRO**
Reitora: Malvina Tania Tuttman

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| Módulo 1 - Introdução à disciplina | 7 |
| Aulas 1/2 – Introdução aos ciclos biogeoquímicos | 9 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Módulo 2 - Litosfera | 23 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Aulas 3/4 – Estrutura e composição da Terra | 25 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Aulas 5/6 – Crosta terrestre: um sistema dinâmico | 41 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Aulas 7/8 – Os materiais formadores da crosta e o ciclo geoquímico das rochas | 55 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Módulo 3 - Dinâmica das paisagens | 71 |
| Aulas 9/10 – Intemperismo e formação de solos | 73 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Aulas 11/12 – Erosão, transporte, deposição sedimentar e diagênese | 87 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Módulo 4 - O registro fóssil | 101 |
| Aulas 13/14 – Os processos diagenéticos e a preservação de fósseis. Os principais tipos de fósseis | 103 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Aulas 15/16 – Noções de Estratigrafia. Datação absoluta e relativa | 117 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Aulas 17/18 – Tempo geológico e os fósseis como um registro dos processos evolutivos ao longo das Eras Geológicas. Bacias Sedimentares | 131 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |
| Módulo 5 - Atmosfera e águas continentais | 153 |
| Aulas 19/20 – Entendendo a paisagem. Os conceitos de geosferas e prisma elementar | 155 |
| <i>Glauca Torres Aragon</i> | |

| | |
|--|------------|
| Aulas 21/22 – Composição química da atmosfera e das chuvas _____ | 167 |
| <i>Glaucia Torres Aragon</i> | |
| Aulas 23/24 – Bacia de drenagem e água subterrânea _____ | 183 |
| <i>Glaucia Torres Aragon</i> | |
| Aulas 25/26 – Rios e lagos - Processos físicos, químicos e biológicos _____ | 193 |
| <i>Álvaro Ramon C. Ovalle</i> | |
| Módulo 6 - Águas costeiras e oceânicas _____ | 209 |
| Aulas 27/28 – Estuários e oceanos - Completando o ciclo hidrológico _____ | 211 |
| <i>Álvaro Ramon C. Ovalle</i> | |
| Aulas 29/30 – Circulação atmosférica e oceânica - El Niño e La Niña _____ | 225 |
| <i>Álvaro Ramon C. Ovalle</i> | |
| Gabarito _____ | 243 |
| Referências _____ | 267 |

Introdução à disciplina

Prezado aluno,

Você está recebendo o primeiro módulo da disciplina Dinâmica da Terra. Nosso principal objetivo é apresentar a você o ambiente físico do nosso planeta e algumas de suas interações com os seres vivos.

Dividimos a disciplina em seis módulos que abordam conteúdos essenciais sobre o tema. Cada módulo é composto por um número de aulas necessário para alcançar os objetivos propostos.

Decidimos organizar estas aulas em conjuntos de duas aulas, correspondendo ao conteúdo que você, estudante, deverá compreender em uma semana.

Nosso objetivo é permitir que você perceba a ligação entre os assuntos apresentados. Para auxiliá-lo(a) nessa caminhada sugerimos um método de estudo que consiste nos seguintes passos:

- Fazer uma leitura inicial do material de cada semana, para construir uma visão de conjunto;
- Ler atentamente os objetivos das aulas e reler o material, procurando verificar se os mesmos foram alcançados;
- Observar atentamente as figuras, relacionando-as com as informações apresentadas;
- Fazer os exercícios avaliativos com calma e atenção, verificando se você alcançou os objetivos propostos. Nesta etapa você deve retornar ao texto quantas vezes achar necessário.

Importante!

Não deixe de esclarecer suas eventuais dúvidas, cada semana, com os tutores.

Módulo 1

Introdução aos ciclos biogeoquímicos

AULAS 1/2

objetivos

Objetivos que você deverá alcançar

- Compreender a importância das interações dos seres vivos com o ambiente físico.
- Entender o conceito de ciclo biogeoquímico e a importância das transformações da matéria entre fases orgânicas e inorgânicas.
- Perceber a existência de reservatórios de massa na natureza e dos principais processos de transferência de massa entre reservatórios.
- Familiarizar-se com parte do vocabulário que será usado durante o curso.

INTRODUÇÃO

Neste módulo inicial será apresentada uma introdução aos ciclos biogeoquímicos, que correspondem a transformações sofridas por alguns elementos químicos presentes na crosta terrestre, incluindo sua absorção pelos organismos e o retorno a formas inorgânicas.

Muitos dos conceitos introduzidos nessas aulas serão estudados detalhadamente em aulas posteriores, tais como: intemperismo, minerais, rochas, etc. Você não deve, portanto, preocupar-se em conhecer cada processo mencionado em detalhes. O nosso principal objetivo é dar uma visão geral das interações dos seres vivos com o ambiente físico, e motivá-lo para as aulas que se seguem.

O CICLO HIDROLÓGICO

Ao longo de nosso curso estaremos requentemente discutindo ciclos da matéria. O conceito de ciclo implica um conjunto de transformações sucessivas e um retorno ao estado inicial. Pode ser aplicado a muitos tipos diferentes de materiais. A Figura 1 é uma representação esquemática de um ciclo genérico, que serve para nos lembrar a importância do retorno ao estado inicial como condição básica para constituir um ciclo.

Um ciclo bem conhecido em sua estrutura geral é o ciclo da água. Podemos representar este ciclo utilizando caixas para os reservatórios de massa e setas para os processos de transferência de massa de um reservatório para o outro, como na Figura 2.

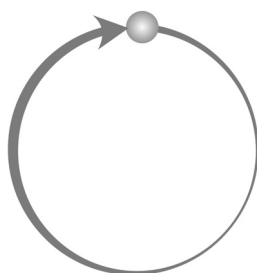


Figura 1: Representação esquemática geral de um ciclo.

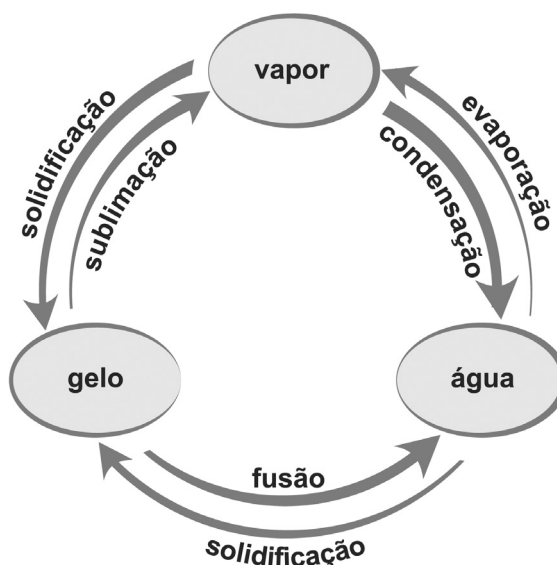


Figura 2: Representação esquemática simplificada do ciclo hidrológico. Os materiais (vapor, água e gelo) também podem ser chamados de reservatórios de massa e são apresentados dentro de elipses. Os processos de transferência de massa de um reservatório para o outro são apresentados ao lado de setas.

Podemos ainda aprofundar um pouco mais nossos conhecimentos sobre o ciclo hidrológico, observando a Figura 3, onde aparecem os valores estimados para a massa de água em cada reservatório na Terra, e ainda as taxas de transferência de um reservatório para outro ao lado das setas. Observe que nos oceanos a evaporação supera a **PRECIPITAÇÃO ATMOSFÉRICA**, produzindo um excesso de vapor que se desloca em direção aos continentes. Nos continentes, a precipitação supera a evaporação, resultando em um fluxo de águas fluviais em direção aos oceanos, fechando o ciclo.

A fonte de energia para o ciclo hidrológico é o sol, uma fonte externa ao planeta, e por isto este ciclo faz parte de um conjunto de processos geológicos denominado “Dinâmica Externa”.

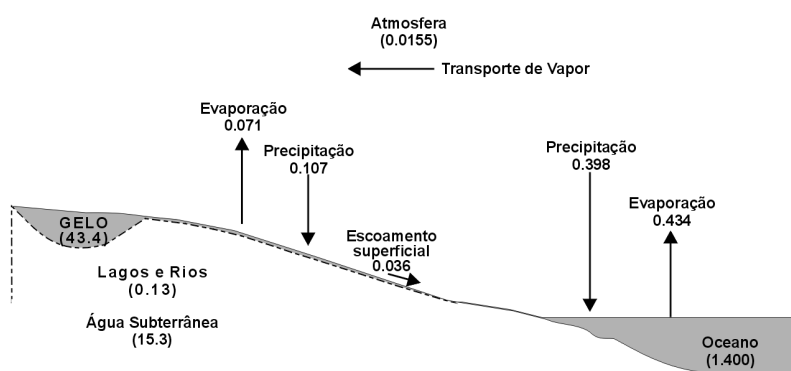
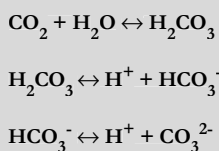


Figura 3: O ciclo hidrológico. Os números entre parênteses representam a massa de água em cada reservatório, em 10^{18} Kg. Os fluxos de massa entre os diversos reservatórios são apresentados ao lado das setas, em 10^{18} Kg/ano. A fonte destas informações é o livro *Global Environment*, Berner & Berner, 1996, capítulo 1.

APRENDENDO UM POUCO MAIS

Apesar de simples em sua estrutura geral, o ciclo hidrológico envolve diversos processos bastante complexos, resultantes da interação da água com outros compartimentos da paisagem. Ao longo do ciclo a água reage com as substâncias com as quais entra em contato (gases atmosféricos, vegetação, solos, etc.) e, em consequência, tem sua composição química alterada.

A **Figura 4** apresenta um diagrama dos caminhos percorridos pela água após sua precipitação na superfície dos continentes. Ao entrar em equilíbrio com o dióxido de carbono atmosférico, a água das chuvas se torna levemente acidificada, devido à formação de ácido carbônico. Esta acidificação aumenta a capacidade da água de chuva



de dissolver substâncias. As reações químicas são mostradas ao lado, desde a hidratação da molécula de CO_2 até as reações de dissociação do ácido carbônico.

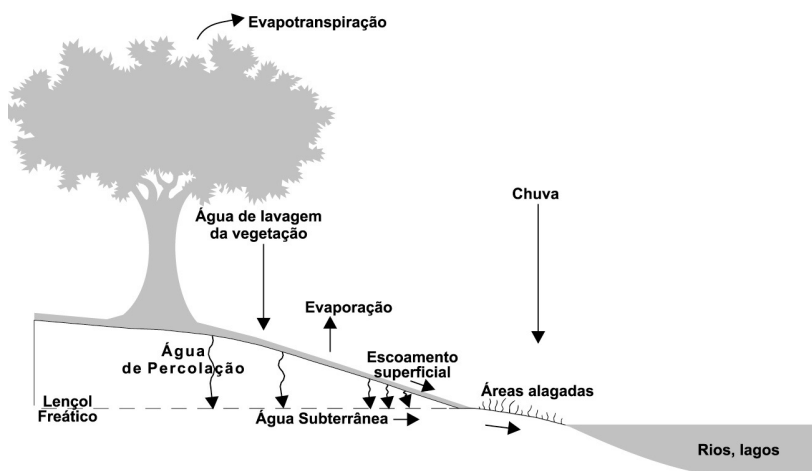


Figura 4: Diagrama dos caminhos percorridos pela água de chuva após sua precipitação na superfície dos continentes.

Ao atravessar a copa das árvores em uma floresta, denominada dossel, a água é retida pela vegetação e, depois, goteja sobre o solo, ou escorre pelo caule das plantas ou pelo tronco de árvores. Neste percurso a água modifica sua composição antes de atingir o solo.

A água que infiltra no solo é chamada **água de percolação**. A água que passa diretamente sobre o solo em direção a um curso de água (como um rio ou lago) é chamada de **água de escoamento superficial**.

Uma vez no solo, a água pode evaporar ou penetrar em maiores profundidades ou ainda ser absorvida por raízes de plantas. No último caso, a água é transportada para cima através da planta e, eventualmente, transpirada a partir da superfície das folhas. Desta maneira a água pode retornar à atmosfera, e o processo é denominado **evapotranspiração**.

A água que penetra abaixo da zona de raízes, algumas vezes, encontra um horizonte de solo cujos poros estão completamente preenchidos por água. Neste ponto, a água passa a ser chamada de água subterrânea, o solo é dito saturado com água, e a porção do solo onde isto ocorre é chamada **LENÇOL FREÁTICO**. Acima do lençol freático os poros

LENÇOL FREÁTICO

Camada do solo na qual os poros se encontram totalmente preenchidos por água.

dos solos são preenchidos por uma mistura de ar e água, e esta região é referida como zona subsaturada, zona de percolação ou de aeração.

- O lençol freático é, na verdade, uma zona do solo totalmente saturada de água, e não uma “camada de água” abaixo da superfície.

A água subterrânea flui lateralmente em subsuperfície devido à ação da gravidade, através dos poros, os quais se comunicam entre si. Quando o lençol freático intercepta a superfície terrestre (veja novamente a Figura 4), a água passa a fluir na forma de nascentes, rios, pântanos e lagos. A contínua contribuição da água subterrânea para os rios, importante nos períodos secos, é conhecida como fluxo de base. A taxa de **pluviosidade** (volume de chuva por unidade de tempo) e a profundidade do lençol freático podem variar em função de alterações climáticas diárias, **SAZONAIS** e anuais.

Quando a água entra em contato com **ROCHAS** e solos, reage lentamente com os **MINERAIS** ali presentes. Os minerais dissolvem-se em diferentes proporções, e alguns dos constituintes dissolvidos reagem entre si para formar novos minerais. A dissolução é intensificada por ácidos produzidos pela atividade de plantas e pelo metabolismo de bactérias (e, em áreas poluídas, pela chuva ácida). O conjunto destes processos é chamado de **INTEMPERISMO** químico.

Além de fatores biológicos, o intemperismo químico é ampliado por processos físicos que agem quebrando as rochas e expondo superfícies adicionais às soluções do intemperismo. O conjunto destes processos recebe o nome de intemperismo físico.

O principal processo de intemperismo físico é o fraturamento de rochas em consequência do congelamento da água. Isto ocorre porque a água contida nas fraturas das rochas aumenta de volume quando congelada, exercendo uma pressão na rocha. Desta forma, o intemperismo físico tem maior influência em altas latitudes e elevações, onde faz mais frio.



Não esqueça!

Juntos, os processos de intemperismo físico, químico e biológico resultam na degradação da rocha, na formação do solo e na mudança radical na composição química da água do solo e da água subterrânea.

SAZONAL

Relativo a eventos cujas características variam ao longo das estações do ano (ex: precipitação pluviométrica).

ROCHA

Agregado de minerais formado naturalmente que constitui parte da crosta terrestre.

MINERAL

Substância com composição química e estrutura cristalina definidas, de origem inorgânica, formada por processos naturais.

INTEMPERISMO

Conjunto de processos que resultam na decomposição das rochas expostas à superfície terrestre, pela ação de agentes físicos (ex.: variações de temperatura), químicos (dissolução de minerais) e biológicos (ação de raízes etc).

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Conjunto de processos responsáveis pela circulação de um elemento químico do ambiente aos organismos e destes novamente ao ambiente na forma de compostos inorgânicos.

OS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

O ciclo hidrológico está intimamente relacionado aos ciclos biogeoquímicos dos elementos. O **CICLO BIOGEOQUÍMICO** de um elemento corresponde a um conjunto de processos responsáveis pela circulação desse elemento químico do ambiente aos organismos e destes novamente ao ambiente, podendo incluir uma fase gasosa e/ou fase sedimentar (inorgânica, sólida). Estas transformações ocorrem através de reações químicas, como exemplificado de forma simplificada na **Figura 5**.

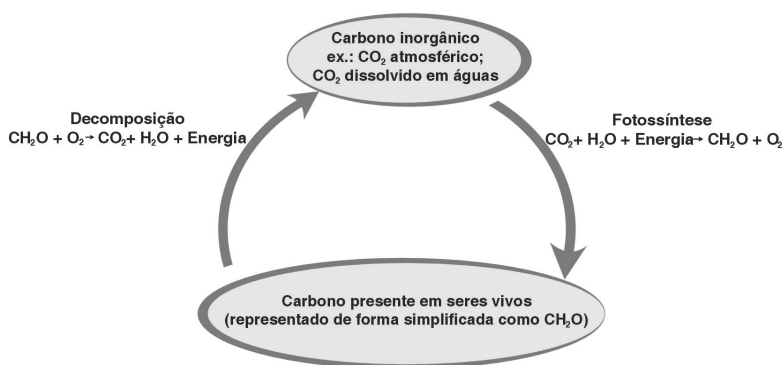


Figura 5: Representação esquemática simplificada do ciclo biogeoquímico do carbono.

NUTRIENTES

Elementos ou compostos necessários para a produção primária.

A palavra biogeoquímico compõe-se do radical *bio* (do grego, *bios*, vida), do radical *geo* (do grego, *gê*, terra) e do radical de químico (*quim*), acompanhado do sufixo -ico. A expressão “**CICLAGEM DE NUTRIENTES**” é muitas vezes empregada com o mesmo sentido, em estudos que enfatizam a parte biótica do sistema. Para aprender um pouco mais sobre os ciclos biogeoquímicos, leia o capítulo sete do livro “Economia da Natureza”, Ricklefs, 1996.

Nesta aula vamos tomar como exemplo os ciclos biogeoquímicos em um tipo particular de ecossistema - o ecossistema florestal.

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS EM FLORESTAS

Em áreas florestais, a química das águas naturais é influenciada pela absorção, estocagem e liberação de nutrientes pela vegetação. Uma floresta pode ser considerada um reservatório de elementos nutrientes. Existe uma entrada de nutrientes através das águas de chuva, e existe

uma saída que ocorre através dos rios. Sendo assim, podemos considerar o ecossistema florestal como uma “caixa preta” e quantificar entradas e saídas de massa (Figura 6).

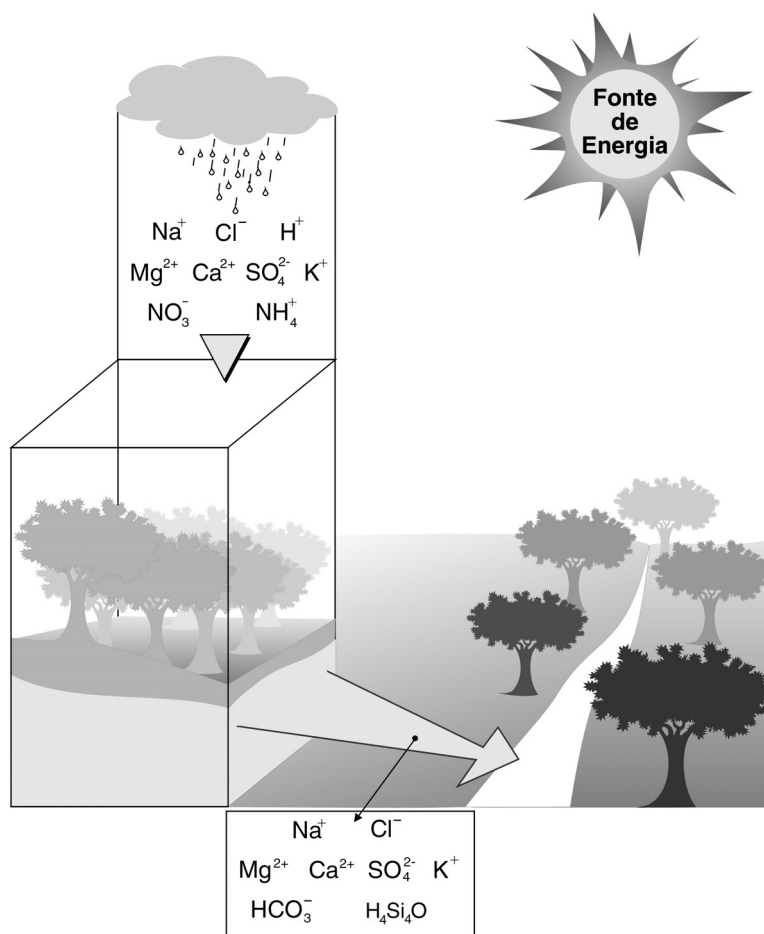


Figura 6: Uma abordagem possível no estudo de ecossistemas florestais: quantificação das massas de nutrientes que entram e saem do sistema, sem detalhamento dos processos que ocorrem internamente.

A noção de massa está associada em geral a substâncias sólidas. Entretanto podemos determinar as concentrações de nutrientes dissolvidos nas águas de chuva, e, multiplicando pelo volume de chuva em uma determinada área, estimar a entrada atmosférica de nutrientes em massa por unidade de tempo:

$$\text{Entrada(mg/dia)} = [\text{concentração do nutriente na chuva (mg/L)} * \text{Volume de chuva (L/dia)}]$$

Da mesma forma, podemos multiplicar a concentração do mesmo nutriente nas águas do rio pela vazão deste rio e estimar a saída do nutriente:

$$\text{Saída (mg/dia)} = [\text{concentração do nutriente no rio (mg/L)} \\ * \text{Vazão do rio (L/dia)}]$$

Esta abordagem no estudo de ecossistemas florestais permite saber se entram mais nutrientes do que saem, ou se ocorre o contrário. Por exemplo, uma floresta para a qual a entrada de nutrientes é maior que a saída é um ecossistema que está em crescimento, isto é, está aumentando sua biomassa.

Mas quais são os principais nutrientes?

Os principais nutrientes necessários às plantas são mostrados na Tabela 1 na ordem das concentrações exigidas para o desenvolvimento das mesmas. A vida não pode existir sem água e dióxido de carbono, que são as principais fontes de carbono, hidrogênio e oxigênio. Além disto, componentes essenciais à vida como proteínas, ácidos nucleicos e ATP, precisam também de nitrogênio, fósforo e enxofre. Estes elementos se combinam para produzir a composição média das plantas terrestres (em base molar) de $C_{1200}H_{1900}O_{900}N_{35}P_2S_1$. Outros elementos maiores incluem magnésio e potássio, que são componentes essenciais na clorofila usada pelas plantas para a fotossíntese. Além destes elementos maiores, alguns nutrientes são necessários em pequenas concentrações.

As principais fontes de nutrientes

Os elementos nutrientes são obtidos pelas plantas em um ecossistema florestal, a partir de quatro fontes imediatas, a saber: a atmosfera, a matéria orgânica morta, minerais e soluções.

Os nutrientes de origem atmosférica incluem gases, que podem ser diretamente absorvidos pelas plantas, e aerossóis, que são pequenas partículas transportadas em suspensão na atmosfera e que são retidas pelas folhas.

| Elemento | Concentração (% em peso seco de tecidos) |
|-----------------|---|
| Carbono (C) | 45 |
| Oxigênio (O) | 45 |
| Hidrogênio (H) | 6 |
| Nitrogênio (N) | 1.5 |
| Potássio (K) | 1.0 |
| Cálcio (Ca) | 0.5 |
| Fósforo (P) | 0.2 |
| Magnésio (Mg) | 0.2 |
| Enxofre (S) | 0.1 |
| Cloro (Cl) | 0.01 |
| Ferro (Fe) | 0.01 |
| Manganês (Mn) | 0.005 |
| Zinco (Zn) | 0.002 |
| Boro (B) | 0.002 |
| Cobre (Cu) | 0.0006 |
| Molibdênio (Mo) | 0.00001 |

Tabela 1: Elementos necessários à nutrição de plantas estimados a partir da composição química média das mesmas. A concentração de cada elemento é determinada em gramas do elemento para cada 100 gramas de tecido vegetal seco. (Fonte: Global Environment, Berner & Berner, 1996).

A matéria orgânica morta no solo contém nutrientes que se tornam disponíveis através da decomposição microbológica. Em florestas tropicais úmidas (em geral desenvolvidas em solos intensamente lavados pela água das chuvas), a matéria orgânica morta (**SERRAPILHEIRA** e matéria orgânica das camadas superficiais do solo) constitui a principal fonte de nutrientes.

Minerais presentes em solos e rochas são a principal fonte de muitos nutrientes, mas requerem solubilização através de processos muito lentos de intemperismo, antes que os nutrientes se tornem disponíveis. Finalmente, a água de percolação transporta nutrientes, derivados de minerais, da água da chuva e da matéria orgânica morta, diretamente para as raízes das plantas.

As próprias árvores podem também constituir fontes de nutrientes. Um elemento em solução é absorvido por uma árvore através de suas

SERRAPILHEIRA

Camada de folhas e restos de plantas parcialmente decompostos acumulado sobre a superfície dos solos.

LIXIVIAÇÃO

Processo de dissolução e remoção de compostos dissolvidos.

raízes e transportado para cima através da mesma. Uma certa quantidade (variável de elemento para elemento) é estocada nos tecidos vivos e mortos (estoque da biomassa) e o restante é disponibilizado para ser reciclado através dos seguintes mecanismos:

1. lavagem/**LIXIVIAÇÃO** dos elementos presentes nas folhas das árvores pelas águas de chuva (mais importante para potássio);
2. queda da serrapilheira (importante reservatório de cálcio e magnésio);
3. exudação pelas raízes dos elementos não utilizados, os quais são liberados em solução por raízes vivas e mortas (mais importante para sódio).

Todos estes processos (queda da serrapilheira, lavagem das folhas, e exudação) adicionam nutrientes ao solo, que são prontamente absorvidos pelas raízes das árvores.

A **Figura 7** apresenta um ciclo biogeoquímico generalizado de um elemento em uma área de floresta, incluindo o ciclo interno já descrito. Neste caso já não observamos mais o ecossistema como se fosse uma “caixa preta”, mas começamos a descrever os processos que ocorrem internamente.

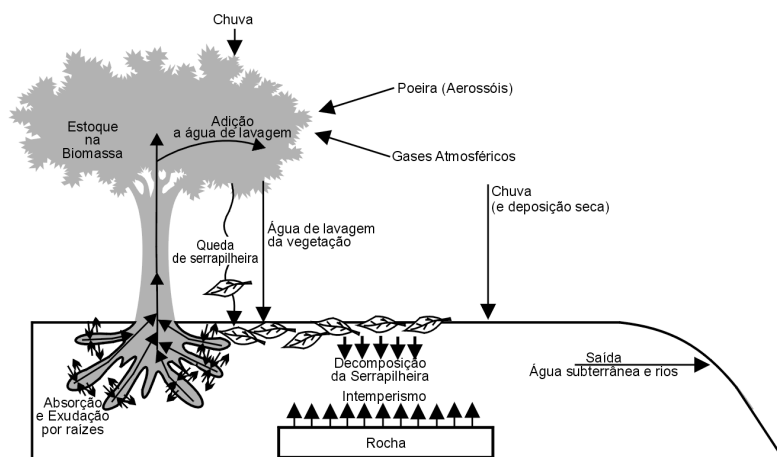
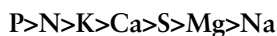


Figura 7: Ciclo biogeoquímico para um elemento genérico em um ecossistema florestal. Entradas externas ao sistema, saídas e ciclos internos são indicados.

As árvores retiram nutrientes das várias fontes discutidas acima. As entradas externas primárias são gases atmosféricos, chuva, aerossóis retidos pela vegetação e as rochas subjacentes. Os gases atmosféricos e a chuva fornecem parte do enxofre, nitrogênio e fósforo, enquanto os aerossóis e rochas fornecem a maior parte do potássio, magnésio, cálcio, sódio e silício. As perdas da floresta ocorrem através do fluxo lateral de água subterrânea e dos rios.

Se uma floresta se encontra em estado estacionário, isto é, se não está crescendo e estocando nutrientes, as entradas se igualam às saídas, e as mudanças na composição da água, passando de água de chuva para água fluvial, se devem à liberação de elementos pelo intemperismo. Assim, é possível estimar taxas de intemperismo através de balanços de massa de elementos. Estes balanços são feitos estimando-se a entrada e saída de massa em uma **BACIA DE DRENAGEM** delimitada.

Pode-se ainda ordenar os elementos de acordo com o grau em que são afetados pela atividade biológica, medindo-se a razão entre o estoque de cada elemento na vegetação viva e morta e sua perda anual no fluxo fluvial (Berner & Berner, 1996):



O elemento mais afetado pela atividade biológica é o fósforo, com o nitrogênio em segundo lugar. Potássio e cálcio são consideravelmente afetados pela vegetação, enquanto o sódio é pouco afetado.

A entrada de fósforo via precipitação em muitas florestas é maior que o fluxo fluvial de saída, uma vez que quantidades enormes de fósforo são estocadas na vegetação. Só em áreas agrícolas, onde grandes quantidades de efluentes e fertilizantes fosfatados entram no fluxo fluvial, os fluxos de saída superam os de entrada via precipitação. A entrada de fósforo via intemperismo ocorre em menores proporções que as entradas de potássio, sódio, cálcio e magnésio, uma vez que o teor de fósforo nas rochas é menor.

Embora a principal fonte de nitrogênio para a biomassa florestal seja o nitrogênio reciclado da matéria orgânica do solo e da água de percolação, a fonte primária do nitrogênio é a atmosfera. O nitrogênio entra no sistema na forma de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+)

BACIA DE DRENAGEM

Área de captação das águas de chuva para um determinado corpo d'água.

dissolvidos na água da chuva, e, no caso de algumas plantas (p. ex. leguminosas), via fixação direta do nitrogênio gasoso atmosférico (N₂) por microorganismos simbióticos das raízes. Muito pouco nitrogênio é adicionado a partir do intemperismo de rochas.

Além da ciclagem de nutrientes, as árvores exercem um controle direto sobre a composição das águas, através do processo de transpiração. Ao longo deste processo água pura é perdida via evaporação a partir da superfície das folhas para a atmosfera. Como resultado, alguns íons dissolvidos tais como o cloreto (Cl⁻), que não são absorvidos pelas árvores, tornam-se mais concentrados na água de percolação.

RESUMO

- A circulação dos elementos químicos entre os organismos e o ambiente físico se dá através de ciclos chamados biogeoquímicos.
- Os ciclos biogeoquímicos dos elementos estão relacionados com o ciclo hidrológico, o qual tem como fonte de energia o sol.
- A evaporação nos oceanos supera a precipitação atmosférica, resultando em um fluxo de vapor em direção aos continentes. Nestes últimos, o volume de chuvas é maior que o volume de água evaporado. Em consequência, formam-se rios e ocorre o escoamento da água, que retorna aos oceanos, fechando o ciclo.
- As águas das chuvas modificam sua composição química ao interagir com diferentes componentes da paisagem, tais como atmosfera, vegetação, solos e rochas.
- Podemos usar a composição química média das plantas como indicador dos elementos químicos necessários ao desenvolvimento das mesmas. Os elementos mais abundantes nas plantas são: carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, magnésio e enxofre. Outros elementos são necessários em pequenas concentrações.
- As principais fontes de nutrientes para as plantas em um ecossistema florestal são a atmosfera, a matéria orgânica morta, os minerais e soluções.

EXERCÍCIOS AVALIATIVOS

Para resolver esses exercícios você deve retornar ao texto sempre que necessário. Caso você sinta alguma dificuldade, procure o tutor da disciplina no seu pólo.

1. Identifique os componentes da paisagem que afetam a composição química das águas fluviais.
2. Faça uma lista de 8 elementos maiores necessários à nutrição das plantas. Procure identificar no texto as principais fontes para cada um destes elementos.
3. O que é um ciclo biogeoquímico de um elemento?
4. Qual é o papel da água nos ciclos biogeoquímicos dos elementos?

Leitura recomendada

BERNER, Elisabeth K.; BERNER, Robert A. *Global Environment: water, air and geochemical cycles*. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 376p. Cap. 4: Chemical weathering and water chemistry.

ESTEVES, Francisco A. *Fundamentos de Limnologia*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602p. Cap. 4: O ciclo da água na biosfera.

RICKLEFS, Robert E. *A Economia da Natureza*. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996. 470p. Cap. 7: Os Caminhos dos Elementos no Ecossistema.

Litosfera

No Módulo 1 vimos que existe uma relação entre os seres vivos e as substâncias inorgânicas presentes na superfície do nosso planeta. Esta relação envolve ciclos da matéria, a qual passa por transformações em que os elementos químicos passam de formas inorgânicas a constituintes de seres vivos e vice-versa. Estes ciclos são fundamentais para o estabelecimento de uma biosfera diversificada tal como a que existe hoje em nosso planeta.

As fontes de elementos químicos, e os processos que os tornam disponíveis para absorção pelos seres vivos são o assunto de nossas próximas unidades.

Neste módulo, iniciaremos este estudo pela **LITOSFERA**, cuja história confunde-se com a história de nosso planeta como um todo – a história da formação da crosta terrestre. A composição química das rochas, solos e águas naturais (continentais e oceânicas), bem como os principais processos de transformação de materiais decorrentes de sua interação, serão discutidos mais adiante ao longo de nosso curso.

LITOSFERA

A crosta e a parte superior do manto terrestre.

Módulo 2

Estrutura e composição da terra

AULAS

3/4

objetivos

Objetivos que você deverá alcançar

- Desenvolver a noção de tempo geológico, em comparação com as escalas de tempo que nos são familiares.
- Conhecer a estrutura interna da Terra e a composição de suas camadas.
- Entender o conceito de **GEOSFERA**.
- Identificar a composição química de cada geosfera.

GEOSFERA

O prefixo “geo” significa Terra; geosfera refere-se ao planeta Terra visto como um sistema. Este sistema pode ser subdividido em subsistemas: litosfera, pedosfera, hidrosfera, biosfera e atmosfera, que interagem entre si.

INTRODUÇÃO

TEMPO GEOLÓGICO

A escala geológica do tempo é da ordem de milhões a bilhões de anos, tendo a Terra se formado a cerca de 4,7 bilhões de anos atrás (A técnica usada para determinar esta idade é assunto da Aula 18).

A estrutura interna da Terra se desenvolveu ao longo de bilhões de anos, e nosso planeta continua se modificando, interna e externamente, até os dias de hoje. Podemos observar estas mudanças em muitas escalas de tempo diferentes. Para nós, o tempo que dura a vida de um ser humano é bastante familiar. A evolução da humanidade vem ocorrendo ao longo de milhares de anos, e como nossos conhecimentos sobre este período são muitos, fica fácil trabalhar também com esta escala temporal. Fica mais difícil imaginar períodos de centenas de milhares ou de bilhões de anos. Mas a formação de nosso planeta teve início há mais de 4 bilhões de anos, e para situar no tempo sua evolução precisamos desenvolver primeiro a noção de **TEMPO GEOLÓGICO**.

TEMPO GEOLÓGICO

O Tempo Geológico está dividido em etapas que marcaram história evolutiva do planeta. As principais subdivisões são chamadas de éons, recebendo os seguintes nomes grego.

- **Hadeano** (ou “anterior à Terra”) – período entre 4,6 e 3,9 bilhões de anos atrás, correspondendo à formação do planeta propriamente dita.

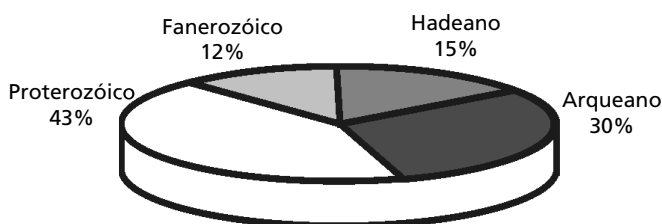
Alguns geólogos agrupam este éon com o seguinte, chamando o conjunto pelo nome Arqueano.

- **Arqueano** (que significa “antigo”) – período entre 3,9 e 2,5 bilhões de anos atrás. A atmosfera do planeta era muito diferente, não continha oxigênio e era rica em metano, amônia e outros gases tóxicos. Foi neste período que a Terra esfriou o suficiente para permitir a formação das rochas que constituem a crosta. Ao longo deste éon surgiram os primeiros seres vivos, cerca de 3.5 bilhões de anos atrás.

- **Proterozóico** (que quer dizer “vida primitiva”) – entre 2,5 bilhões e 570 milhões de anos atrás. Corresponde ao período em que se formaram continentes estáveis. Os organismos existentes durante o Proterozóico eram algas e bactérias. Existem evidências da ocorrência de alguns organismos multicelulares no final do Proterozóico (medusas, vermes e outros).

- **Fanerozóico** (que significa “vida visível”) – teve início há 570 milhões de anos atrás e continua até o presente. É marcado pelo aparecimento de organismos com partes duras tais como conchas, sendo muito melhor estudado e apresentando muitas subdivisões. A atmosfera começa a conter oxigênio, fator que certamente contribuiu para a diversificação dos seres vivos. Durante o Éon Fanerozóico a vida evoluiu de invertebrados marinhos até peixes, anfíbios e répteis. Surgiram as plantas terrestres, os dinossauros e os mamíferos, finalmente aparecendo os primatas e o homem. As evidências desta história evolutiva serão discutidas com mais detalhes na aula 20.

Observe que os três primeiros éons abrangem 88% da história da Terra (Gráfico 1) e em geral são estudados com poucas subdivisões. Os organismos existentes até o fim do Proterozóico eram constituídos apenas por tecidos moles, e os registros de sua existência são raros, constituídos em geral por impressões deixadas pelos mesmos em **ROCHAS SEDIMENTARES**.



ROCHAS SEDIMENTARES

Rochas formadas na superfície da Terra pela consolidação de detritos e outros materiais.

Gráfico 1: As principais divisões do tempo geológico.

Uma comparação interessante foi apresentada por Myers no livro “Gaia - an Atlas of Planet Management”, traçando um paralelo entre a evolução do universo e a duração de um dia. Esta comparação pode nos ajudar a compreender a escala geológica do tempo e é apresentada na **Figura 8**.

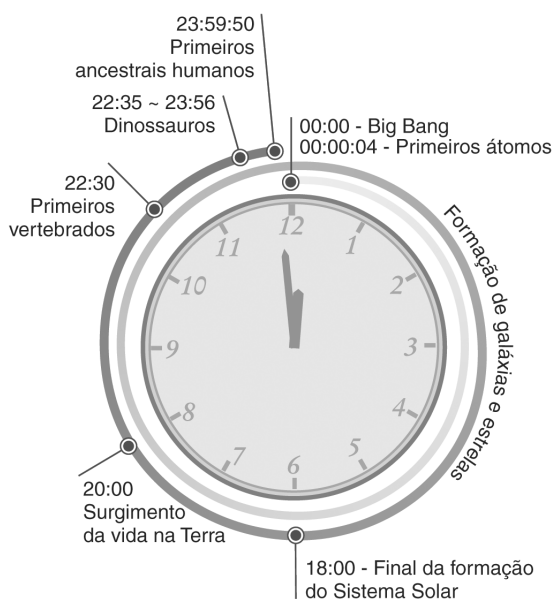


Figura 8: Comparação entre o tempo decorrido desde o Big Bang e a duração de um dia.

BIG BANG

Teoria que explica a origem do universo através de uma explosão cósmica, ocorrida entre 12 e 13,5 bilhões de anos atrás. Antes desta explosão, toda a matéria estaria compactada em um único ponto, de densidade extremamente alta.

- o **BIG BANG** teria ocorrido no primeiro bilionésimo de segundo deste dia imaginário;
- os primeiros átomos estáveis teriam surgido nos primeiros quatro segundos;
- em algumas horas, estariam formadas galáxias e estrelas, mas o Sistema Solar só teria se formado ao anoitecer, às 18 horas;
- a vida na Terra demoraria um pouco mais a surgir, por volta das 20 horas, e os primeiros vertebrados às 22 horas e trinta minutos;
- os dinossauros teriam vivido entre 23 horas e 35 minutos e 23 horas e 56 minutos;
- somente quando faltassem 10 segundos para a meia noite teriam surgido os primeiros ancestrais humanos;
- a revolução industrial teria ocorrido no último bilionésimo de segundo deste dia.

Diante disso, cabe uma reflexão sobre a interação entre o desenvolvimento tecnológico e o meio ambiente. A formação dos solos, por exemplo, é um processo que leva milhares a milhões de anos para se completar, dependendo do clima e outros fatores que discutiremos com mais detalhe na Aula 11. A remoção abusiva das coberturas vegetais originais e o uso não planejado dos solos podem levar a um desgaste deste recurso natural em décadas, ou mesmo em poucos anos. Em consequência, a nossa capacidade de produzir alimentos será reduzida. Apesar da existência do homem na Terra ocupar apenas uma pequena fração do tempo de existência do planeta, as intervenções humanas sobre o ambiente têm provocado uma radical transformação da superfície e da atmosfera terrestres.

Mais adiante em nossa disciplina discutiremos diferentes intervenções do homem sobre o ambiente e suas consequências. Para discutir estas questões precisamos conhecer bem o ambiente físico de nosso planeta, e vamos começar este estudo pela formação do mesmo.

Origem do sistema solar

Embora a origem do Sistema Solar não seja conhecida com exatidão, evidências astronômicas e geológicas levam à suposição de que uma explosão de estrelas pré-existentes espalhou partículas em vastas distâncias no espaço. A maior parte da matéria nesta nuvem de gás e poeira interestelar era composta pelo elemento hidrogênio, com pequenas porcentagens de todos os outros elementos. A atração gravitacional entre os átomos resultou em sua aproximação, formando um disco em rotação. Perto do centro deste disco ocorriam pressões e temperaturas muito altas e a formação do Sol teve início, com o processo de fusão nuclear. A fusão de átomos de hidrogênio formando átomos de hélio, mais pesados, ocorre ainda hoje no interior do Sol, e é o processo responsável pela emissão de energia.

A fusão nuclear no interior do Sol, no entanto, não é capaz de produzir elementos mais pesados que o hélio. Acredita-se que os demais elementos em nosso sistema solar sejam oriundos da poeira estelar pré-existente. Nas partes externas da nuvem de gás e poeira o resfriamento resultou na condensação de pequenas partículas sólidas (**PLANETESIMAIS**), as quais deram origem aos planetas, luas e outros sólidos de nosso sistema.

PLANETESIMAIS

Partículas formadas pela poeira cósmica e pela condensação de materiais espalhados no espaço pelo Big Bang.

Formação da Terra

ACRESÇÃO DE PLANETESIMAIS

Processo de colisão e aglutinação dos planetesimais, resultando em massas maiores.

Acredita-se que o estágio inicial de formação da Terra tenha sido a **ACRESÇÃO DE PLANETESIMAIS**. Estas pequenas partículas formavam uma nuvem ao redor do sol a cerca de 4,7 bilhões de anos atrás. A colisão e aglutinação dos planetesimais deu origem à Terra e a outros planetas, que com o tempo foram adquirindo massas maiores. Este processo ocorreu ao longo do Éon Hadeano, entre 4,6 e 3,9 bilhões de anos atrás.

Onovo planeta provavelmente era constituído por um aglomerado de compostos de sílica e óxidos de ferro e manganês. Embora os planetesimais fossem relativamente frios, três fatores levaram ao aquecimento do planeta (Figura 9):

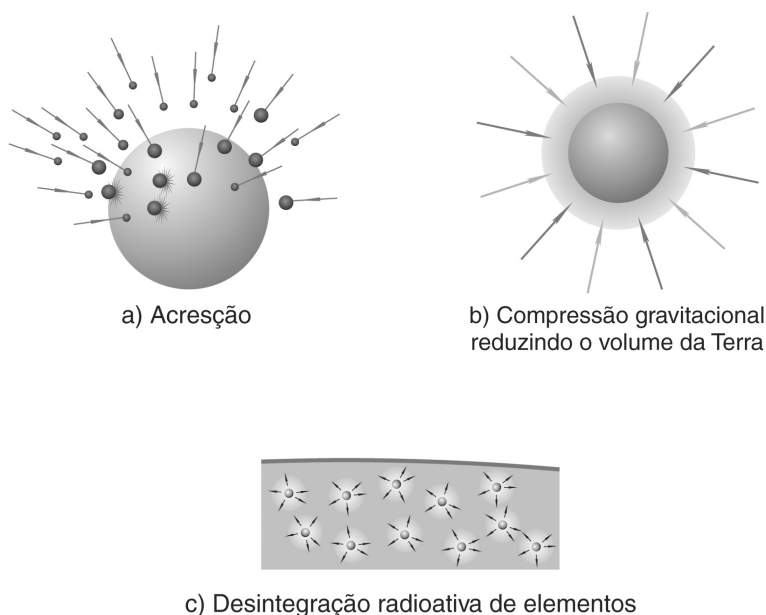


Figura 9: Diagramas dos 3 mecanismos que podem ter causado o aquecimento da Terra primitiva.

- A energia liberada pelo impacto dos planetesimais e meteoros (o impacto levava à transformação de energia cinética do movimento em energia térmica, a qual era parcialmente irradiada de volta para o espaço e parcialmente armazenada no planeta em formação);

- A energia gerada pela compressão do interior do planeta, a qual ficava retida em grande parte devido ao fato das rochas serem péssimos condutores de calor;

- E a energia gerada pelo **DECAIMENTO RADIOATIVO** de átomos de urânio, tório e potássio.

Aquecimento e diferenciação planetária

A Terra primitiva foi provavelmente uma mistura homogênea, sem estrutura interna e sem continentes e oceanos. O aumento da temperatura no interior do planeta levou à fusão do ferro, que por ser mais pesado que os outros elementos constituintes da Terra deslocou-se para o centro do planeta em formação. Os materiais mais leves lá presentes também se encontravam em fusão, e se deslocaram para a superfície. Esse processo é conhecido como catástrofe do ferro (**Figura 10**).

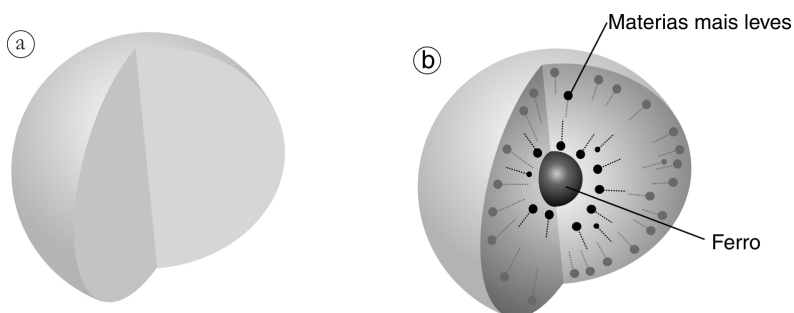


Figura 10: a) A Terra primitiva, provavelmente um corpo homogêneo. b) Processo de diferenciação, no qual o ferro concentrou-se no núcleo e os materiais mais leves “flutuaram”, formando a crosta.

O ferro é um elemento muito abundante – corresponde a cerca de 1/5 da massa da Terra, e este processo levou à formação de um núcleo constituído principalmente por ferro e elementos afins (como o níquel) no centro da Terra. Massas rochosas fundidas se tornavam mais leves que outras, no estado sólido, e ascendiam formando a crosta primitiva.

Como resultado, a terra apresenta um zoneamento em camadas, constituído por um núcleo denso de ferro, um manto de composição intermediária e uma crosta superficial formada por materiais mais leves. O escape de gases, neste processo, resultou na formação da

DECAIMENTO RADIOATIVO

Os átomos de elementos radioativos se desintegram espontaneamente, emitindo partículas subatômicas. Estas partículas são absorvidas pela matéria presente em volta do átomo que as emitiu, e sua energia cinética é transformada em calor. Embora os elementos radioativos estejam presentes na Terra em pequenas quantidades, grandes quantidades de energia são liberadas em seu decaimento, ainda nos dias de hoje. Você aprenderá mais sobre estes processos na aula 18.

atmosfera e dos oceanos. A estrutura interna do nosso planeta pode ser observada na **Figura 11**. Observe atentamente as proporções entre as diferentes camadas.

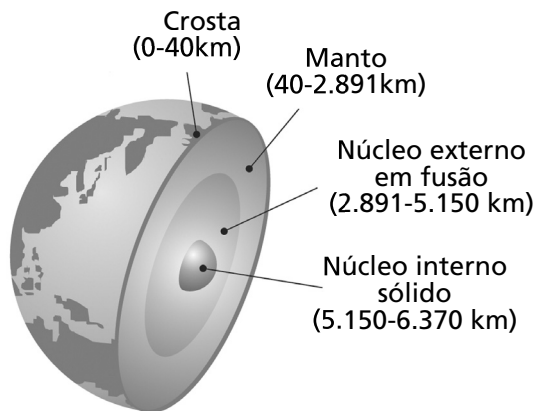


Figura 11: Estrutura interna da Terra, resultado do processo de diferenciação: um núcleo interno sólido, um núcleo externo em fusão (ambos compostos principalmente por ferro), um manto de composição intermediária e uma fina crosta superficial com-posta por elementos mais leves.

Estudando o interior do planeta

a) O que nos revelaram os terremotos

Enquanto o raio da Terra tem cerca de 6.300 km, os poços mais profundos já perfurados alcançaram pouco mais de 7 km. Sendo assim, é muito fácil estudar a crosta terrestre, da qual podemos obter amostras com facilidade, mas as informações sobre o interior do planeta têm que ser obtidas por métodos indiretos.

Diversos ramos da ciência vêm contribuindo para o conhecimento do interior do planeta ao longo do tempo. Um ramo da geologia que muito contribuiu para o conhecimento da estrutura interna do nosso planeta foi a **GEOFÍSICA**. Os terremotos, por seus efeitos devastadores, vêm sendo estudados com especial atenção pelos geofísicos.

Diferentes ondas de impacto (também chamadas de ondas sísmicas) são geradas quando ocorrem terremotos. Assim como o som e a luz têm diferentes velocidades de propagação nos diversos meios, dependendo de sua rigidez e densidade, também as ondas sísmicas têm diferentes velocidades de propagação nos diversos meios. A determinação da velocidade de propagação destas ondas quando ocorre um sismo (terremoto) torna possível estimar a natureza e espessura do material

GEOFÍSICA

Aplicação da física ao estudo da Terra.

atravessado. Este tipo de estudo permitiu conhecer a profundidade em que se encontram os limites que separam as principais camadas da Terra, e ainda a natureza dos materiais presentes em cada uma delas. Veja na **Figura 12a** os principais tipos de onda de impacto, e como o estudo de sua propagação permitiu conhecer melhor a estrutura interna da Terra. Observe por exemplo na **Figura 12b** que a partir de uma determinada distância do foco do terremoto as ondas S não chegam mais diretamente à superfície terrestre, pois não se propagam no núcleo externo constituído por material em fusão.

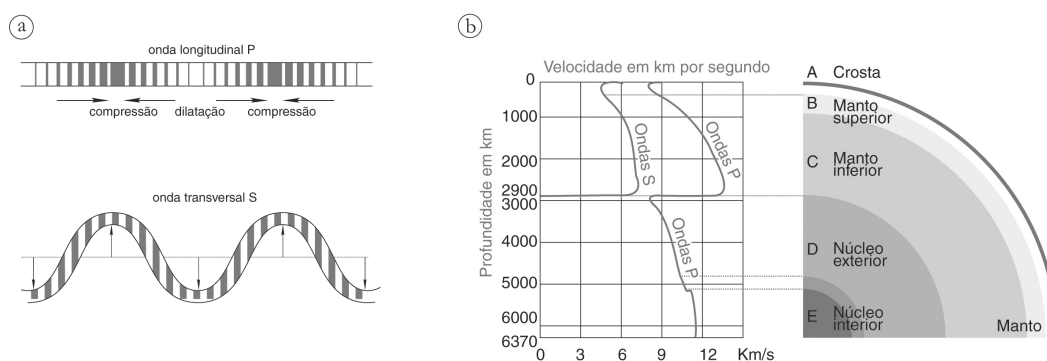


Figura 12: a) Esquema do mecanismo de propagação das ondas sísmicas. As ondas longitudinais, P, se propagam com movimentos de compressão e dilatação na mesma direção do deslocamento da onda. Nas ondas transversais, S, este movimento é perpendicular à direção de propagação. b) A cada mudança de velocidade das ondas sísmicas corresponde uma das subdivisões maiores da Terra. Observe que as ondas S, que só se propagam em meio sólido, não atravessam o núcleo externo da Terra. Fonte: Leinz, V. & Amaral, S. E., 1972 Geologia Geral Companhia Editora Nacional, Cap. 13.

b) As conclusões dos astrônomos

Outra ciência que contribuiu muito para o estudo do nosso planeta foi a astronomia. As técnicas astronômicas permitem determinar a massa do planeta, analisando sua influência gravitacional sobre a Lua, demais planetas e outros corpos celestes. Os sistemas de posicionamento global (GPS) existentes hoje, por outro lado, permitem determinar com exatidão o diâmetro do planeta, e assim determinar seu volume.

Combinando os dados relativos à massa e volume, podemos estimar a densidade média da Terra, e o resultado obtido é de $5,5 \text{ g/cm}^3$. Por outro lado, as amostras coletadas na crosta terrestre podem ser analisadas diretamente. Sua densidade é de cerca de $2,8 \text{ g/cm}^3$. Estes

resultados nos revelam uma informação muito importante: a densidade da Terra não é homogênea, ou seja, o manto e o núcleo terrestres devem possuir uma densidade mais elevada que a crosta, resultando na densidade média calculada anteriormente.

Esta conclusão confirma a existência de camadas no interior do planeta, que diferem das rochas superficiais da crosta pelo menos em relação a uma característica: a densidade. A elevada densidade do ferro, suas propriedades magnéticas e a existência de um campo eletromagnético terrestre são fortes evidências de que o núcleo terrestre seja mesmo constituído principalmente por ferro (**Figura 13**).

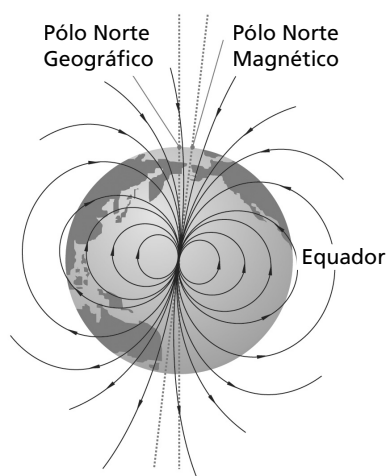


Figura 13: O campo magnético da Terra atua como um magneto gigante no centro da Terra, levemente inclinado em relação ao eixo de rotação.

c) As informações que vieram do espaço

Outra técnica que permite inferir a composição dos materiais presentes no interior da Terra está relacionada com a geoquímica. Desde o início do século passado os geoquímicos vêm analisando e classificando os **METEORITOS** em quatro grandes grupos, de acordo com sua composição química e mineralógica. Um primeiro grupo é muito semelhante às rochas encontradas na crosta da Terra; outro tipo é composto por uma liga de ferro e níquel, com características muito diferentes de qualquer material da crosta terrestre, sendo semelhantes ao que se supõe que constitua o núcleo terrestre; um terceiro grupo apresenta composição química intermediária entre os dois primeiros, sendo considerado semelhante à provável composição do manto terrestre; e o último grupo, chamado grupo dos meteoritos primitivos, apresenta composição semelhante à composição média da Terra como um todo (incluindo aí crosta, manto e núcleo).

METEORITOS

Fragmento de material de origem extraterrestre que cai na Terra.

Uma vez que os meteoritos foram formados ao mesmo tempo em que o Sistema Solar é presumível que sua composição seja semelhante à da Terra. Sua origem provavelmente está relacionada a corpos celestes que passaram por um processo de diferenciação semelhante ao que ocorreu com a Terra, e o último grupo provavelmente foi originado de corpos não diferenciados.

A **Tabela 2** apresenta algumas características das principais camadas da Terra, com base nas informações apresentadas anteriormente, produzidas por diferentes áreas do conhecimento.

| Profundidade (km) | Camada | Densidade (g/cm ³) | Temperatura (°C) |
|-------------------|-----------------|--------------------------------|------------------|
| 15 a 25 | Crosta Superior | 2,7 | 600 |
| 25 a 50 | Crosta Inferior | 2,95 | 1.200 |
| 1200 | Manto Superior | 3,3 | 3.400 |
| 2900 | Manto Inferior | 4,7 | 4.000 |
| 6370 | Núcleo | 12,2 | 4.000 |

Tabela 2: Estrutura interna da Terra (Fonte: Popp, JH (1999) Geologia Geral. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 15a edição, Capítulo 1 (O estudo da Terra).

As geosferas

A **Tabela 3** compara a abundância dos elementos na Terra e na crosta terrestre. Devido à catástrofe do ferro, a abundância do mesmo na crosta é muito menor do que no planeta como um todo, sendo por outro lado a crosta enriquecida em silício, alumínio, cálcio, potássio e sódio.

| | Terra (%) | Crosta Terrestre (%) |
|----|-----------|----------------------|
| Fe | 35 | 6 |
| O | 30 | 46 |
| Si | 15 | 28 |
| Mg | 13 | 4 |
| Ni | 2,4 | < 1 |
| S | 1,9 | < 1 |
| Ca | 1,1 | 2,4 |
| Al | 1,1 | 8 |
| K | < 1 | 2,3 |
| Na | < 1 | 2,1 |

Tabela 3: Composição química da Terra e da Crosta Terrestre (Dados obtidos a partir de Krauskopf, K. B., 1979, Introduction to Geochemistry, Tóquio, McGraw-Hill, Inc. p. 516).

A diferenciação não separou os elementos apenas em função de seu peso atômico, como se poderia pensar. Os elementos químicos formam compostos, cujas propriedades físicas e químicas (afinidades químicas, pontos de fusão, densidades, etc.) governam sua distribuição. Os compostos que se formam dependem, por outro lado, das configurações eletrônicas dos átomos que os compõem. Por exemplo, alguns silicatos de cálcio, sódio, potássio e alumínio – os feldspatos – apresentam baixos pontos de fusão (entre 700 e 1000°C) e são relativamente leves quando fundidos, tendo por isso se concentrado na crosta. O manto, situado entre a crosta e o núcleo é um reservatório de silicatos ferro magnesianos, que se fundem em temperaturas mais elevadas e são mais pesados que os feldspatos. Elementos pesados como ouro e platina têm pouca afinidade com oxigênio e silício, e provavelmente estão concentrados no núcleo, enquanto urânio e tório, embora apresentem elevado peso atômico, formam óxidos e silicatos com facilidade, encontrando-se concentrados na crosta.

A tendência que os elementos químicos apresentam de se ligar preferencialmente com elementos afins, suas diferentes características físicas e químicas e sua importância para os organismos condicionou a formação de diferentes geosferas na superfície terrestre: Estas geosferas interagem entre si, ocorrendo uma migração dos elementos de uma geosfera para outra, como vimos ao falar sobre ciclos biogeoquímicos nas aulas 1 e 2.

É importante compreender que as geosferas são subdivisões da crosta terrestre, para fins de organização do seu estudo. Não constituem camadas separadas como as camadas do interior da Terra, mas ocorrem em profunda interação. Veja no quadro a seguir a identificação das geosferas:

| | |
|---|---|
| Litosfera (prefixo “lito” = rocha) | É parte externa rochosa da Terra, incluindo a crosta e a parte superior do manto. |
| Pedosfera (prefixo “pedo” = solo) | Corresponde ao conjunto dos solos e sedimentos na superfície da crosta terrestre. |
| Biosfera (prefixo “bio” = vivo) | É constituída pela totalidade dos seres vivos na Terra. |
| Hidrosfera (prefixo “hidro” = água) | É composta pelos oceanos, lagos e rios, mais a água subterrânea, neve e gelo. Algumas vezes é subdividida em hidrosfera doce e salgada. |
| Atmosfera (prefixo “atmo” = gás, vapor) | É a camada de gases que envolve a Terra. |

A **Tabela 4** apresenta os elementos químicos mais abundantes em cada uma das geosferas. Observe que elementos muito solúveis como cloro e sódio tendem a se concentrar na hidrosfera. Os nutrientes (principais constituintes dos seres vivos) ocorrem em maior proporção na biosfera. Elementos como os gases nobres, que não se combinam facilmente com outros elementos, e elementos que formam moléculas voláteis se concentram na atmosfera. Os elementos que formam cátions muito eletropositivos (como os metais alcalinos e alcalino-terrosos) tendem a acumular-se na litosfera.

| Litosfera (Crosta) | Hidrosfera | | Atmosfera | Biosfera |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| | Doce | Marinha | | |
| Oxigênio | Oxigênio | Oxigênio | Nitrogênio | Oxigênio |
| Silício | Hidrogênio | Hidrogênio | Oxigênio | Carbono |
| Alumínio | Cálcio | Cloro | Argônio | Hidrogênio |
| Ferro | Carbono | Sódio | Carbono | Cálcio |
| Cálcio | Cloro | Enxofre | Neônio | Nitrogênio |
| Magnésio | Silício | Magnésio | Hélio | Potássio |
| Sódio | Sódio | Cálcio | | Silício |
| Potássio | Magnésio | Potássio | | Fósforo |
| Titânio | Enxofre | Carbono | | Magnésio |
| Hidrogênio | Potássio | Estrôncio | | Sódio |
| Fósforo | Nitrogênio | Boro | | Cloro |

Tabela 4: Abundância dos elementos em cada geosfera (Adaptado de Fortescue, J.A.C., 1980, Environmental Geochemistry, A Holistic Approach, New YorkSpringer Verlag, Cap. 6, Tab. 6.3, p. 56).

Várias vezes ao longo da nossa disciplina voltaremos a falar sobre a distribuição dos elementos nas diferentes geosferas. Por isso, é muito importante que você, estudante, comece a se familiarizar com esta tabela.

RESUMO

- A estrutura interna da Terra se desenvolveu ao longo de bilhões de anos, e nosso planeta continua se modificando, interna e externamente, até os dias de hoje.
- O Tempo Geológico está dividido em etapas que marcaram a história evolutiva do planeta. As principais subdivisões são chamadas de éons, recebendo os seguintes nomes gregos: **Hadeano** (4,6 a 3,9 bilhões de anos atrás) correspondendo à formação do planeta propriamente dita; **Arqueano** (3,9 a 2,5 bilhões de anos atrás) correspondendo à formação das rochas que constituem a crosta, com o aparecimento dos primeiros seres vivos; **Proterozóico** (2,5 bilhões a 570 milhões de anos atrás) quando se formaram continentes estáveis, e com a presença de algas e bactérias; **Fanerozóico** (570 milhões de anos atrás ao presente) marcado pelo aparecimento de uma atmosfera rica em oxigênio e organismos diversificados.
- A formação da Terra, durante o Éon Hadeano, ocorreu pela acreção de planetesimais.
- O planeta provavelmente era constituído por um aglomerado homogêneo de compostos de sílica e óxidos de ferro e manganês.
- O aquecimento desta massa homogênea ocorreu por causa da energia liberada pelo impacto dos planetesimais e meteoros, pela compressão gravitacional e pelo decaimento radioativo de átomos de urânio, tório e potássio.
- O aumento da temperatura no interior do planeta levou à fusão do ferro, que por ser mais pesado que os outros elementos constituintes da Terra deslocou-se para o centro do planeta em formação. Os materiais mais leves lá presentes também se encontravam em fusão e se deslocaram para a superfície. Esse processo é conhecido como catástrofe do ferro.

- Como resultado, a Terra apresenta um zoneamento em camadas, constituído por um núcleo denso de ferro, um manto de composição intermediária e uma crosta superficial formada por materiais mais leves. O escape de gases, neste processo, resultou na formação da atmosfera e dos oceanos.
- A estrutura interna da Terra é conhecida a partir de: estudo da propagação de ondas de impacto geradas por terremotos (geofísica); comparação entre a densidade do planeta, estimada a partir de estudos astronômicos, a densidade das rochas presentes na superfície; e a análise geoquímica de meteoritos.
- Podemos subdividir a Terra em sub-sistemas (geosferas) para facilitar seu estudo: litosfera, pedosfera, biosfera, hidrosfera e atmosfera. A abundância dos elementos químicos em cada geosfera será determinada por suas características, como solubilidade e tipo de ligação química preferencial.
- Procure memorizar os elementos mais abundantes em cada geosfera, observando as principais diferenças (Tabela 3).

EXERCÍCIOS AVALIATIVOS

Procure responder às questões a seguir com calma e atenção. Retorne ao texto sempre que for necessário, e procure o tutor da disciplina no pólo caso você tenha alguma dúvida. É importante que você procure esclarecer suas dúvidas a cada semana!

1. Descreva em linhas gerais a estrutura interna da Terra.
2. Quais são as características que distinguem crosta, manto e núcleo?
3. Quais são as evidências de que existe realmente esta estrutura? Explique.
4. Faça um resumo das etapas envolvidas na formação da Terra.
5. Compare a espessura da crosta terrestre com o raio do planeta Terra.

PARA PENSAR

Você estudou nestas aulas como foi que a Terra chegou a apresentar as características que hoje possui, em relação à sua composição. Com base nestes conhecimentos, tente avaliar se é provável a existência de vida em outros planetas fora do Sistema Solar. Nesse caso, como deveria ser a atmosfera? E a hidrosfera?

Leitura recomendada

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 376p. Cap. 1: O estudo da Terra.

Site recomendado

GEOLOGY entrance. UCMP exhibit halls. Disponível em: <<http://www.ucmp.berkeley.edu/exhibit/geology.html>>. Acesso em: 25 maio 2005.

Crosta terrestre: um sistema dinâmico

AULAS 5/6

objetivos

Objetivos que você deverá alcançar

- Entender que o planeta Terra como um todo (e não apenas sua superfície) ainda está em plena atividade, e em constante transformação.
- Reconhecer as evidências da deriva continental.
- Compreender o fenômeno de deslocamento de placas tectônicas.
- Entender que a formação e a ruptura do supercontinente Pangéia ocorreu ao longo de milhões de anos, em uma escala de tempo geológica, mas o processo continua ativo nos dias de hoje.

Pré-requisito

Para melhor compreender estas aulas
você deve ter alcançado os objetivos
das aulas 3 e 4.

INTRODUÇÃO

A crosta terrestre está em constante transformação em consequência da atuação simultânea de duas fontes de energia: o calor interno do núcleo terrestre e a energia solar.

A energia solar é a fonte de energia para os processos de decomposição das rochas expostas à superfície terrestre. O conjunto dos processos de decomposição recebe o nome de intemperismo. A decomposição de rochas presentes em regiões de relevo acentuado tem como consequência a remoção dos materiais desagregados através da erosão. Os materiais removidos são depositados em áreas mais baixas e planas. O resultado deste conjunto de processos é a atenuação das feições mais escarpadas do relevo.

Em contraste, outras atividades geológicas têm como fonte de energia o calor interno da Terra. Estas atividades geológicas em geral atuam no sentido inverso: são formadoras de relevo. São estas últimas que estudaremos nestas aulas.

AS PRIMEIRAS HIPÓTESES SOBRE A CROSTA TERRESTRE

Durante o século XIX acreditava-se que a Terra era, originalmente, uma massa fundida e que se encontrava em resfriamento e contração. Segundo esta **HIPÓTESE**, o volume do planeta estava diminuindo. As grandes dobras observadas em cadeias de montanhas (Figura 14) eram consideradas consequência do resfriamento e contração do interior do planeta. A superfície do planeta estaria “enrugando” de tal forma que poderia ser comparada à casca de uma fruta que havia murchado.

HIPÓTESE

proposta ou conceito científico que consiste em uma tentativa de explicar um fenômeno natural.

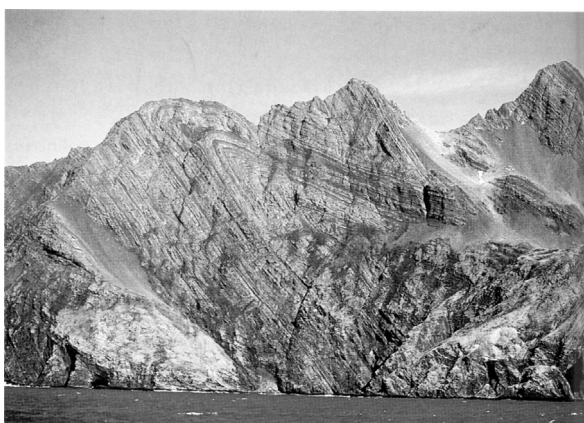


Figura 14: Rochas apresentando estrutura em dobra. Esta intensa deformação é típica de rochas que já fizeram parte de uma cordilheira. Ilha Geórgia do Sul (próximo à Antártica).

Fonte: Murck, Barbara W.; Skinner, Brian J. *Geology today: understanding our planet*. John Wiley and Sons: New York, 1999.

Esta hipótese de contração, entretanto, não explicava a forma e posição dos continentes. O contorno dos continentes (especialmente América do Sul e África) sugeria o afastamento de partes complementares da crosta. Outras feições ainda sugeriam ocorrer um afastamento entre as partes, tais como fendas e vales de origem tectônica (Figura 15).

No início do século XX pesquisadores descobriram que o decaimento radio-ativo(relembre as aulas 3 e 4) produzia calor, capaz de aquecer o interior da Terra. Foi então proposto que a Terra estaria aquecendo, e não resfriando, e, conseqüentemente, expandindo, e não contraindo.



Figura 15: Cordilheira Meso-Atlântica, superfícies acima do nível do mar, na Islândia. O afastamento entre as partes é indicado pelas setas. Fonte: Press, Frank; Siever, Raymond. Understanding Earth. 3.ed. New York: W. H. Freeman, 2000.

Com a expansão do planeta, um continente primitivo teria “rachado” e começado um processo de afastamento. Esta hipótese explicava bem a semelhança entre as linhas de costa da América do Sul e da África, que poderiam ser “encaixadas” como peças de um quebra-cabeças (Figura 16), mas não explicava estruturas de contração tais como as dobras mostradas na Figura 14.

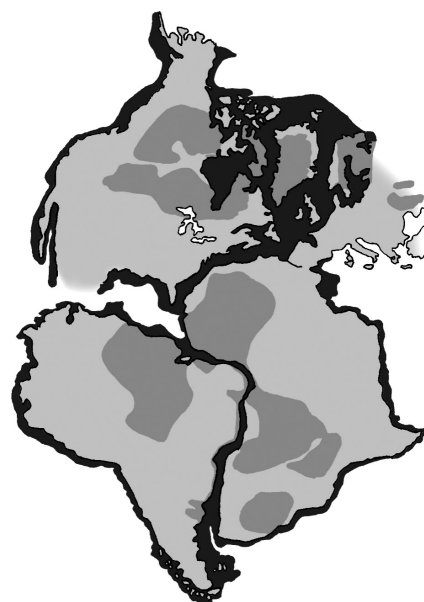
Durante muito tempo os geólogos ficaram divididos entre estas duas hipóteses. No início do século XX foi elaborada formalmente a hipótese da **DERIVA CONTINENTAL**.

DERIVA CONTINENTAL

o lento movimento lateral dos continentes na superfície da Terra.

Figura 16: O ajuste do contorno dos continentes nas margens do Atlântico foi notada por cientistas desde o final do século XVI. A partir desta observação Wegener postulou, em 1915, a existência de um supercontinente primitivo, que recebeu o nome de Pangéia. Wegener citou ainda como evidências feições geológicas semelhantes em lados opostos do Atlântico. A correspondência entre antigas rochas existentes em regiões adjacentes na América do Sul e África e na América do Norte e Europa é mostrada em cinza.

Fonte: Press, Frank; Siever, Raymond. Understanding Earth. 3.ed. New York: W. H. Freeman, 2000.



■ Plataforma Continental
■ Ocorrência de rochas antigas semelhantes

ALFRED LOTHAR WEGENER

Foi o primeiro dos pesquisadores de sua época a buscar outras evidências geológicas e paleontológicas de uma antiga união dos continentes sul americano e africano, além da semelhança das linhas de costa.

PANGÉIA

nome de origem grega, significando “todas as terras”; foi usado por Wegener para designar um supercontinente que teria sido rompido cerca de 200 milhões de anos atrás dando origem aos continentes tais como os conhecemos hoje.

TEORIA

proposta ou conceito científico que explica um fenômeno natural, corroborado por intensa observação e experimentação.

A hipótese da deriva continental

A hipótese da deriva continental foi elaborada por **ALFRED WEGENER** em 1910, que concebeu a idéia de que todos os continentes hoje existentes estiveram unidos em algum tempo remoto, formando um supercontinente, o qual ele chamou de **PANGÉIA**. Segundo esta hipótese o Pangéia fragmentou-se, e seus fragmentos flutuaram como gelo até suas posições atuais.

Para que uma hipótese se transforme em uma teoria, deve ser corroborada por extensiva observação e experimentação. Foram necessários muitos anos de estudo para que a hipótese da deriva continental de Wegener se transformasse na teoria da **TECTÔNICA DE PLACAS**.

Algumas evidências corroboravam a hipótese de Wegener: O contorno dos continentes, em especial da América do Sul e África, que se encaixam perfeitamente como peças de um quebra-cabeças.

TECTÔNICA DE PLACAS

movimento horizontal e interação de grandes fragmentos da litosfera

A correspondência entre as rochas nas margens de cada continente. Esta correspondência é, entretanto, difícil de ser observada, uma vez que os processos de formação e destruição das rochas não param de atuar. No tempo de Wegener, as técnicas de datação radiométrica estavam começando a ser desenvolvidas, e não era fácil determinar a idade de uma rocha. Wegener observou a correspondência entre algumas rochas, mas outras não apresentavam correspondência. Hoje sabemos que a correspondência entre as rochas da costa da América do Sul e da África é particularmente boa para rochas com mais de 550 milhões de anos, sugerindo que estes continentes estavam unidos e faziam parte do Pangéia antes deste tempo.

A continuidade de feições geológicas como cadeias de montanhas (veja o exercício avaliativo 1).

Depósitos glaciais formados no final da Era Paleozóica (veja a Aula 20) encontrados na América do Sul e na África, os quais apresentariam perfeita continuidade caso os continentes se encontrassem justapostos. Estes depósitos constituem uma evidência importante de que o clima nestes continentes era semelhante no final do Paleozóico, mais frio que o atual, e não compatível com a localização atual em relação ao equador.

O registro fóssil: por exemplo, uma samambaia antiga, *Glossopteris*, cujos restos fósseis foram encontrados no sudeste da África, na América do Sul, Austrália, Índia e Antártica (Figura 17). As sementes da *Glossopteris* são muito grandes e pesadas para serem transportadas por tão grandes distâncias pelo vento ou por correntes marinhas. Esta planta desenvolve-se em clima frio, sendo esta evidência consistente com a idéia de que estes continentes estiveram unidos e submetidos a um clima muito diferente do atual.



Área de ocorrência de sementes de fósseis de *Glossopteris*

Figura 17: Mapa com a localização de fósseis de *Glossopteris*, uma planta do Período Carbonífero da Era Paleozóica. A distribuição geográfica dos fósseis sugere que os continentes estavam unidos do modo indicado na figura no final da Era Paleozóica. Fonte: Murck, Barbara W.; Skinner, Brian J. *Geology today: understanding our planet*. John Wiley and Sons: New York, 1999.

CRESCIMENTO DO ASSOALHO OCEÂNICO

Processo através do qual o assoalho oceânico divide-se em partes que afastam-se mutuamente a partir de uma cordilheira meso-oceânica; novas porções de crosta oceânica são formadas, “empurrando” as duas partes e ocupando o espaço entre elas.

O crescimento do assoalho oceânico

Apesar das diversas evidências a favor da deriva continental, muitos geólogos continuavam rejeitando esta hipótese, pela falta de uma explicação para o mecanismo e a origem da força promotora do movimento.

Após a Segunda Guerra Mundial, a exploração do **ASSOALHO OCEÂNICO** foi intensificada graças às novas tecnologias desenvolvidas no esforço de guerra. O mapeamento das Cordilheiras Meso-Atlânticas revelou a existência de um profundo vale escarpado (“rift valey”) ao longo de seu centro. Este relevo sugeria que o assoalho oceânico estaria se expandindo ao longo dos vales. Nova crosta oceânica estaria formando-se pela erupção de material oriundo do manto terrestre, seguido de afastamento lateral. Faltavam, entretanto, outras evidências que corroborassem a hipótese do crescimento do assoalho oceânico (Veja no site <http://wrgis.wr.usgs.gov/docs/parks/animate/pltecan.html> animações desse processo).

PALEOMAGNETISMO

Magnetismo apresentado por uma rocha formada muito tempo atrás.

O estudo do paleomagnetismo

Por volta de 1950 o estudo do **PALEOMAGNETISMO** forneceu importantes evidências sobre a deriva continental. A Terra possui um campo magnético invisível, que interage com tudo que está sobre sua superfície ou em seu interior. Se um magneto (tal como a agulha de uma bússola) for colocado a flutuar livremente, o mesmo apontará para o norte magnético da Terra, e se inclinará em direção à superfície do planeta. Próximo ao equador, o magneto ficará em posição quase horizontal, e perto do pólo apontará diretamente para o mesmo, ficando quase em posição vertical.

Algumas rochas contêm minerais que atuam como magnetos. Uma rocha ígnea se forma através do resfriamento e cristalização de uma massa fundida, chamada magma. Os minerais vão cristalizando dentro desta massa conforme a mesma esfria, e assim, alguns minerais, que são capazes de cristalizar em temperaturas mais altas, ficam em suspensão, isto é, ficam “flutuando” dentro da massa fundida. Dentre estes minerais, alguns são capazes de orientar-se segundo o campo magnético terrestre. Sendo assim, o magnetismo destes minerais pode informar sobre a polaridade do campo magnético terrestre e sobre a latitude em que uma rocha se formou.

Por volta de 1960, três décadas após a morte de Wegener, as propriedades magnéticas das rochas que formam o assoalho do oceano Atlântico começaram a ser estudadas. Os oceanógrafos descobriram que o assoalho do Atlântico é constituído por bandas com polaridades normal e reversa (Figura 18). Estas bandas, simétricas em relação à linha central do oceano, estão dispostas paralelamente à cordilheira Meso-Atlântica.

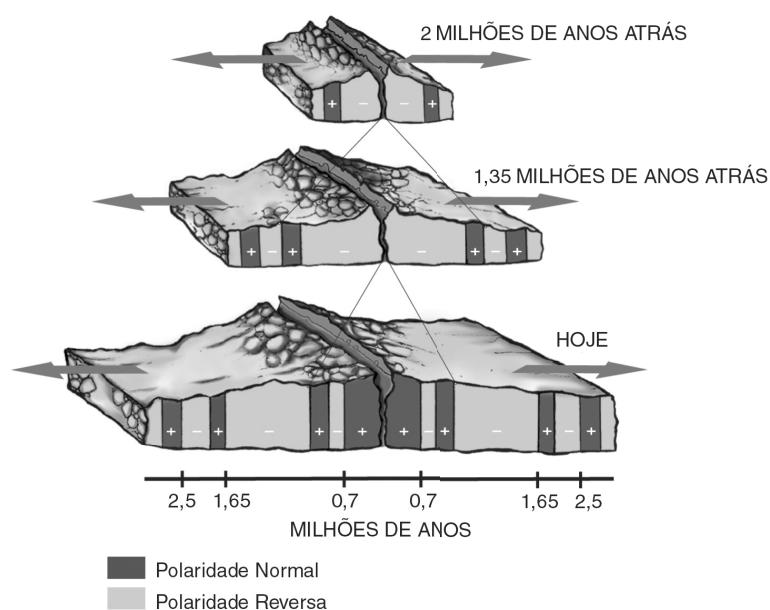


Figura 18: Faixas com diferentes polaridades magnéticas no assoalho do Oceano Atlântico. A lava extravasada ao longo da Cordilheira Meso-Atlântico forma nova crosta oceânica. Conforme a lava resfria ela se torna magnetizada com a polaridade do campo magnético terrestre no momento da cristalização da rocha. Conforme as placas tectônicas de cada lado da cordilheira se afastam, vão se formando faixas de crosta oceânica com polaridades normal e reversa. As faixas resultantes são simétricas dos dois lados da cordilheira.

Adaptado de: Murck, Barbara W.; Skinner, Brian J. *Geology today: understanding our planet*. John Wiley and Sons: New York, 1999.

O mecanismo de expansão do assoalho oceânico, a partir do centro, com a formação de novas rochas vulcânicas, oriundas do manto terrestre, e “empurrando” as bandas formadas anteriormente em direção aos continentes, começa então a ser aceito pelos geólogos. As idades das rochas confirmaram este mecanismo: as rochas próximas à cordilheira são mais jovens que as rochas próximas aos continentes (Figura 19).

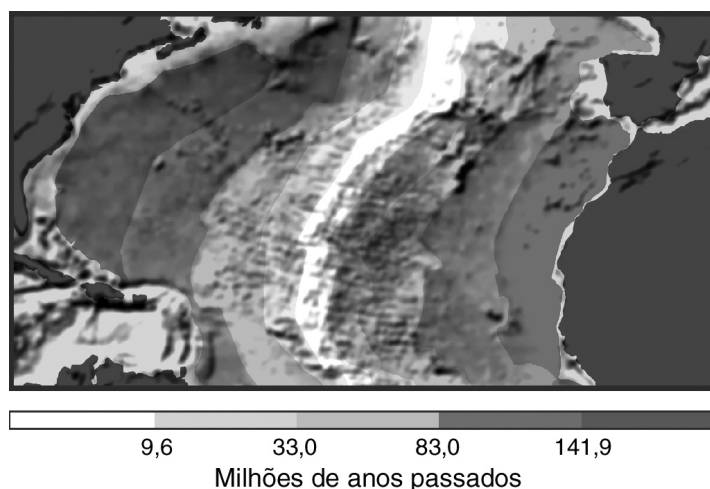


Figura 19: Desenho mostrando as idades das rochas dos dois lados da cordilheira Meso-Atlântica, em milhões de anos antes do presente. As faixas mais jovens se encontram ao longo da cordilheira, enquanto as mais antigas estão mais afastadas. Fonte: Murck, Barbara W.; Skinner, Brian J. *Geology today: understanding our planet*. John Wiley and Sons: New York, 1999.

A teoria da tectônica de placas

As evidências da deriva continental e da expansão do assoalho oceânico começavam a convencer os geólogos por volta de 1960, mas ainda faltava uma teoria que explicasse estes fenômenos de forma coerente.

A parte externa da Terra, chamada de **LITOSFERA**, é constituída pela crosta e a parte superior do manto. Esta camada é pouco espessa, fria e rígida se comparada às rochas subjacentes (relembre as aulas 3 e 4!). O restante do manto é muito quente, e embora constituído por rochas sólidas, comporta-se de forma relativamente maleável. Em particular, a camada que fica imediatamente abaixo da litosfera (denominada astenosfera), encontra-se em temperatura muito próxima ao ponto de fusão das rochas, sendo por isto muito maleável.

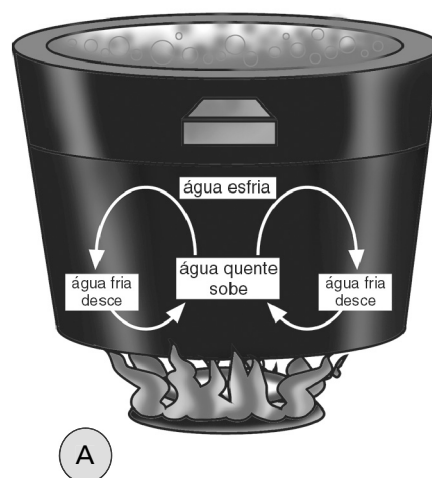
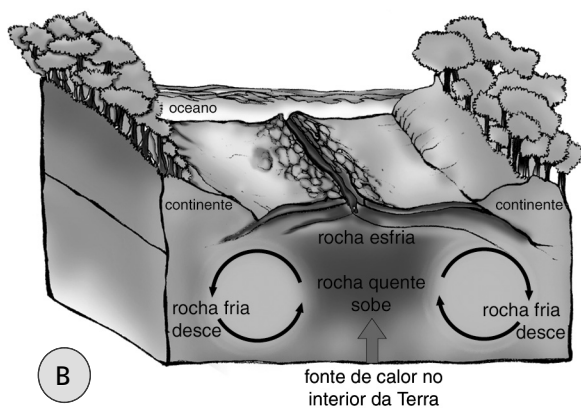
O fluxo de calor do núcleo quente da Terra para a superfície é tão lento que condicionou a existência de um mecanismo mais eficiente de transferência de calor – a convecção. Este mecanismo levou a um rápido resfriamento da Terra, com a solidificação do manto, mas parte do núcleo continua em estado de fusão (Veja as aulas 3 e 4).

LITOSFERA

Crosta e parte superior do manto terrestre

Embora a convecção seja mais comum em líquidos (ocorrendo, por exemplo, ao fervermos água em uma panela), pode ocorrer também com sólidos, o que é o caso do manto terrestre (Figura 20). Para imaginar a deformação de um sólido, pense no que acontece com um metal aquecido submetido à pressão (por exemplo, pelas pancadas de um martelo). O metal não sai do estado sólido, mas vai se deformando de acordo com a pressão recebida.

Figura 20: A) Forma de convecção familiar, a água aquecida sobe e ao resfriar na superfície, torna a descer, em rápidos movimentos circulares. B) Esquema simplificado da convecção no manto terrestre, apontado como a razão para a movimentação das placas tectônicas. As massas aquecidas sobem em direção à superfície, formando novas placas que divergem. Em outras margens ocorrerá a convergência das placas que divergem. Em outras margens ocorrerá a convergência das placas e uma delas mergulha sob a outra, sendo consumida. Os continentes fazem parte das placas tectônicas e migram com as mesmas. A velocidade do movimento é muito baixa, da ordem de poucos centímetros por ano. Adaptado de: Press, Frank; Siever, Raymond. *Understanding Earth*. 3.ed. New York: W. H. Freeman, 2000.



É importante considerar a escala de tempo deste movimento das correntes de convecção do manto terrestre – uma escala geológica de milhões de anos, quando comparamos com a convecção da água em uma panela, que ocorre em uma escala de segundos.

O resfriamento do planeta, que ocasionou as correntes de convecção do manto, é responsável também pela fragmentação da crosta, mais fria e rígida, sobrejacente. Os fragmentos assim produzidos são chamados de placas tectônicas.



Podemos identificar atualmente seis grandes placas tectônicas e várias placas menores (Figura 21). Estas placas rígidas estão assentadas sobre material quente, maleável, e em movimento resultante da convecção do manto, deslocando-se horizontalmente e deformando-se em consequência das colisões. Este movimento individual das placas resulta em três tipos de movimento relativo: divergente, convergente ou deslizamento lateral. O movimento relativo entre duas placas tectônicas adjacentes resulta em diferentes tipos de margem.

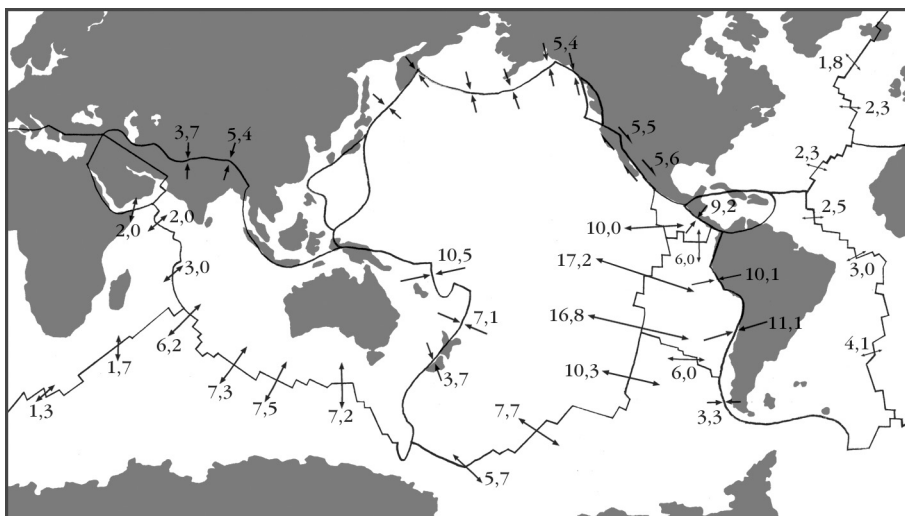


Figura 21: Limites das principais placas tectônicas, velocidades relativas (em centímetros por ano) e direções de separação ou convergência entre placas. Setas paralelas indicam deslizamento lateral entre placas.

Fonte: Press, Frank; Siever, Raymond. Understanding Earth. 3.ed. New York: W. H. Freeman, 2000.

A Figura 22 ilustra os diferentes tipos de margem de placas tectônicas. Veja no site <http://wrgis.wr.usgs.gov/docs/parks/animate/pltecan.html> animações dos diferentes movimentos relativos possíveis.

a) Margens Divergentes

As **MARGENS DIVERGENTES** são fraturas na litosfera, ao longo das quais duas placas estão se afastando. Podem ocorrer tanto na crosta continental (ex: leste da África) como na oceânica (ex: Oceano Atlântico). Acredita-se que uma pluma de calor se propague através do manto, promovendo a fratura da litosfera e a produção de rochas vulcânicas que ocuparão o local fraturado, empurrando lateralmente as rochas preexistentes.

MARGEM DIVERGENTE

Fronteira ao longo da qual duas placas tectônicas deslocam-se, afastando-se.

b) Margens Convergentes

As **MARGENS CONVERGENTES** são aquelas em que está ocorrendo a colisão de duas placas. Podem convergir duas placas oceânicas, duas continentais ou uma de cada tipo. Quando uma placa oceânica está envolvida na colisão, forma-se uma **ZONA DE SUBDUÇÃO**, com uma placa “mergulhando” por baixo da outra. As zonas de subducção são marcadas por profundas trincheiras oceânicas e linhas de vulcões, como na Indonésia (encontro de duas placas oceânicas) e nos Andes (encontro de uma placa oceânica com uma continental). Quando ocorre a colisão de duas placas continentais as rochas tendem a deformar-se dando origem a cadeias de montanhas como os Himalaias.

c) Deslizamento Lateral

Quando duas placas deslizam lateralmente, ocorre um desgaste das mesmas como no caso da Falha de San Andreas, na Califórnia.

MARGEM CONVERGENTE

Fronteira ao longo da qual duas placas tectônicas se deslocam, aproximando-se.

ZONA DE SUBDUÇÃO

Fronteira ao longo da qual uma placa litosférica desce, mergulhando em direção ao manto terrestre, por baixo de outra placa tectônica.

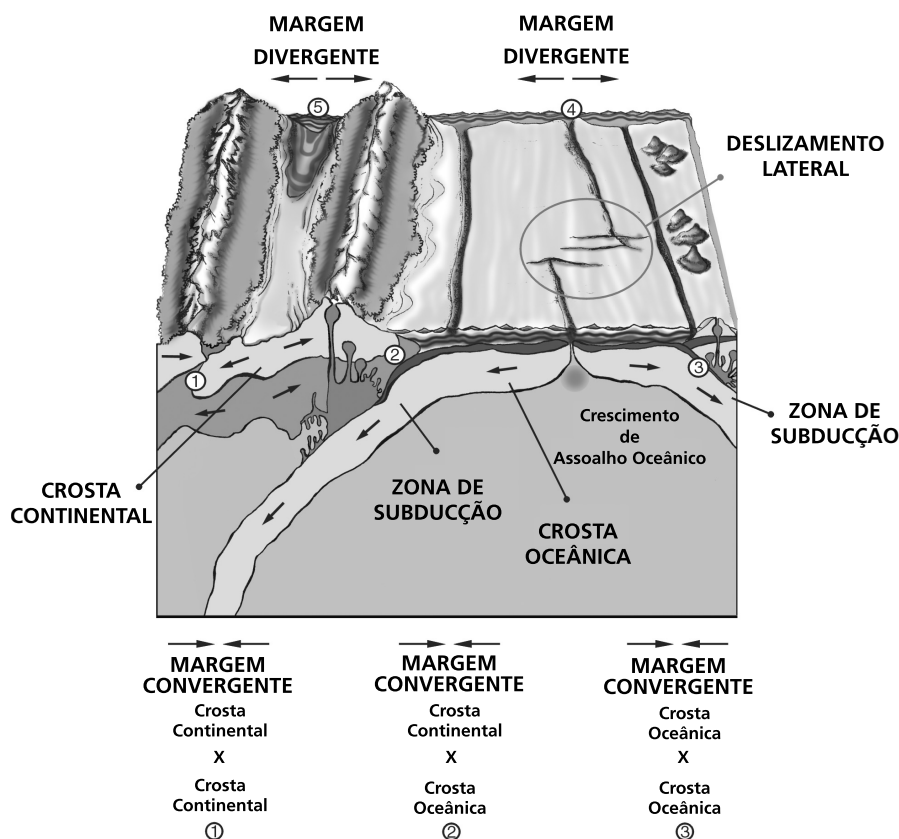


Figura 22: Tipos de margem de placas tectônicas: divergentes, convergentes e de deslizamento lateral. Nos continentes as placas convergentes formam grandes cadeias de montanhas, como a Cordilheira do Himalaia (1); a convergência de uma placa oceânica e uma continental, resulta na subducção da placa oceânica e na formação de uma cordilheira na placa continental, como é o caso da Cordilheira dos Andes (2); a convergência de duas placas oceânicas resulta na formação de um arco de ilhas vulcânicas, como na Indonésia (3). Nos oceanos, as margens divergentes formam cordilheiras Meso-Oceânicas, como a Cordilheira Meso-Atlântica (4). Placas continentais divergentes formam vales tectônicos, como no leste da África (5).

Por que a teoria da tectônica é considerada unificadora...

O ciclo tectônico resulta em um balanço. A adição de material novo à crosta nas margens divergentes é compensada pelo consumo de material nas zonas de convergência. Sendo assim, não é mais necessário recorrer às idéias de que o volume do planeta estaria variando ao longo do tempo geológico, e as hipóteses de expansão e contração foram definitivamente abandonadas.

Por que não percebemos o movimento das placas tectônicas?

O movimento das placas tectônicas não é percebido por nós devido à sua baixa velocidade – de 1 a 10 cm por ano. Suas mais evidentes manifestações são terremotos e vulcões, que ocorrem preferencialmente ao longo das margens das placas.

RESUMO

A hipótese da deriva continental foi formulada no início do século XX, e postulava a existência de um supercontinente denominado Pangéia, no passado geológico. Este continente teria se fragmentado e os fragmentos se afastado até as posições atuais.

- As principais evidências da deriva continental conhecidas naquela época eram: a semelhança do contorno dos continentes; a correspondência entre rochas nas margens de cada continente; a continuidade aparente de cordilheiras em continentes que hoje estão separados; a presença de fósseis em áreas restritas mas envolvendo diferentes continentes.
- Novas evidências decorrentes do estudo do assoalho oceânico surgiram em meados do século XX: a existência de um vale profundo ao longo do centro das cordilheiras meso-oceânicas; a existência de bandas paleomagnéticas com polaridades normal e reversa, paralelas e simétricas em relação às cordilheiras meso-oceânicas; a determinação das idades de rochas e sedimentos no assoalho oceânico evidenciando idades crescentes com o afastamento das cordilheiras meso-oceânicas.

- Com base nestas evidências foi formulada a Teoria da Tectônica de Placas. De acordo com essa teoria o calor do núcleo terrestre condicionou a existência de correntes de convecção no manto terrestre, responsáveis pela fragmentação e movimentação das placas tectônicas.
- A Terra, portanto, se encontra em transformação ainda nos dias de hoje. A movimentação das placas tectônicas é muito lenta, e por essa razão não podemos perceber diretamente esse movimento.
- Ao longo do tempo geológico ocorreu a formação e a ruptura de um continente único, denominado Pangéia, dando origem aos atuais continentes.
- Nas margens das placas tectônicas podem ocorrer três tipos de movimento relativo: convergente, divergente ou deslizamento lateral.

EXERCÍCIOS

Ao resolver as questões abaixo você estará revendo pontos importantes e avaliando o quanto aprendeu. Retorne ao texto sempre que for necessário, e procure o tutor da disciplina no pólo caso você tenha alguma dúvida. **É importante que você procure esclarecer suas dúvidas a cada semana!**

1. Localize em um Atlas os Montes Apalaches, no nordeste dos EUA e leste do Canadá, e imagine sua relação com os Alpes Escandinavos, caso a América do Norte e a Europa se encontrassem unidas.
2. O que era o Pangéia?
3. Que feições geológicas são explicadas pela teoria da tectônica de placas?
4. Como foi que o estudo do paleomagnetismo contribuiu para transformar a hipótese de Wegener da deriva continental na teoria da tectônica de placas?

5. Qual é a velocidade de deslocamento de uma placa tectônica?
6. A distância percorrida por Cabral aumentou de modo expressivo (em relação à largura do Oceano Atlântico) desde 1500 até hoje?
7. Antes do estabelecimento da teoria da tectônica de placas, as teorias de expansão e de contração do globo terrestre eram bastante discutidas. Quais as principais críticas a cada uma delas?

PARA PENSAR

1. Como seria a superfície terrestre caso não existisse a tectônica de placas?
2. Você caracterizaria a tectônica de placas como hipótese ou teoria? Por quê?
3. Que evidência você procuraria em outros planetas para verificar a possível ocorrência de tectônica de placas?

Leitura recomendada

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p.

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p.

Sites recomendados

This dynamic earth. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html>>. Acesso em: 25 maio 2005. (este site do Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS - contém um livro sobre o assunto, atualizado e com ilustrações de excelente qualidade);

PLATE Tectonics Animations. Disponível em: <<http://wrgis.wr.usgs.gov/docs/parks/animate/index.html>>. Acesso em: 25 maio 2005. (este site é fortemente recomendado: contém animações dos processos estudados nesta aula. É importante observar as animações, mesmo que você não entenda os textos em inglês. Elas são auto-explicativas.)

Os materiais formadores da crosta e o ciclo geoquímico das rochas

AULAS

7/8

objetivos

Objetivos que você deverá alcançar

- Diferenciar elementos químicos, minerais e rochas.
- Reconhecer os três grandes grupos de rochas: ígneas, sedimentares e metamórficas.
- Compreender o ciclo geoquímico das rochas.

Pré-requisito

A composição química da crosta terrestre; o conceito de ciclo da matéria; os conteúdos das aulas 1 a 6.

Nas aulas anteriores vimos como foi formada a crosta terrestre e aprendemos um pouco sobre sua dinâmica. Encerraremos o segundo módulo de nossa disciplina conhecendo um pouco melhor os materiais que constituem a crosta terrestre: os elementos químicos que compõem os minerais, e estes últimos, que constituem os “tijolos” formadores das rochas. As rochas constituintes da crosta terrestre podem ser classificadas em três grandes grupos, em relação à sua origem: ígneas, sedimentares ou metamórficas. Veremos ainda como as constantes transformações decorrentes da dinâmica da crosta e da ação da energia solar resultam em uma verdadeira “reciclagem” das rochas: o ciclo geoquímico.

INTRODUÇÃO

A nossa civilização depende dos minerais de muitas formas. Nós desenvolvemos técnicas de mineração para obter metais, fertilizantes, materiais de construção e para fins industriais. Nós adicionamos sal (um mineral) à nossa comida, e nossos alimentos são cultivados em solos ricos em minerais.

Os minerais podem também causar doenças. A inalação de finas partículas de poeira de quartzo (um mineral comum) pode dar origem a uma doença chamada silicose. Todos nós inalamos este tipo de poeira, já que o quartzo é a mais abundante das partículas microscópicas em suspensão na atmosfera. Não ficamos doentes, pois a quantidade é relativamente pequena. No passado, em algumas minerações, era comum o trabalhador adoecer devido à inalação de grandes quantidades deste tipo de poeira. Hoje em dia já existem técnicas de controle da poeira neste tipo de ambiente.

Sem os minerais não poderíamos viver da maneira como vivemos. Nesta aula vamos aprender de que forma as substâncias se combinam para formar os minerais, e para isso recordaremos propriedades dos elementos e compostos químicos que os constituem.

Os minerais são ainda os constituintes fundamentais das rochas que formam a crosta terrestre. As rochas também estão presentes em nosso dia-a-dia, nos diferentes materiais de construção. Conheceremos aqui algumas de suas características e propriedades.

RELEMBRANDO...

ELEMENTOS QUÍMICOS, átomos e íons

Os elementos químicos são as substâncias mais fundamentais nas quais a matéria pode ser separada por meios químicos comuns. O sal de cozinha (NaCl), por exemplo, não é um elemento, pois pode ser separado em sódio (Na) e cloro (Cl). Nem o sódio nem o cloro podem ser “quebrados” posteriormente por meios químicos comuns, e são, portanto, elementos.

Você já estudou bastante sobre os elementos químicos no Ensino Médio. Vale a pena recordar um pouco sobre eles, e os símbolos usados para sua identificação (por exemplo, H para hidrogênio, O para oxigênio).

Uma pequena porção de um elemento químico é constituída por uma enorme quantidade de partículas, denominadas átomos. O **ÁTOMO** é a menor partícula individual que retém as propriedades de um elemento químico.

Os átomos (**Figura 23**) são constituídos por prótons, partículas carregadas positivamente, por nêutrons, partículas eletricamente neutras, e por elétrons, que possuem carga elétrica negativa. O núcleo dos átomos é formado por prótons e nêutrons, e os elétrons movem-se ao redor do núcleo. Outras partículas subatômicas vêm sendo identificadas por físicos e químicos, mas para o nosso estudo basta conhecermos as partículas principais.

ELEMENTO QUÍMICO

Substância mais fundamental na qual a matéria pode ser separada por meios químicos comuns (envolvendo energias inferiores às das reações nucleares).

ÁTOMO

A menor partícula individual que mantém as propriedades distintivas de um dado elemento químico.

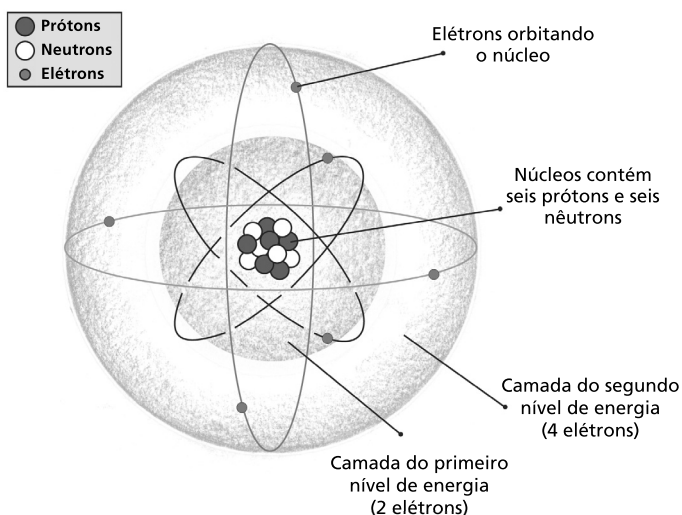


Figura 23: Diagrama de um átomo de carbono-12 (^{12}C). No centro está o núcleo contendo seis prótons e seis nêutrons. Os prótons possuem carga elétrica positiva e os nêutrons não possuem carga. Seis elétrons negativamente carregados circulam ao redor do núcleo, percorrendo caminhos complexos denominados orbitais, representados no diagrama de forma simplificada. Dois elétrons estão em orbitais mais próximos do núcleo, ocupando a primeira camada ou nível de energia. Quatro se encontram em orbitais mais afastados, ocupando a segunda camada.

ÍON

Átomo que possui um excesso de carga elétrica positiva ou negativa.

CÁTION

Íon positivamente carregado, devido à perda de um ou mais elétrons.

ÂNION

Íon negativamente carregado devido à captura de um ou mais elétrons.

COMPOSTO QUÍMICO

Combinação de átomos de um ou mais elementos com átomos de outro elemento em uma proporção específica.

MOLÉCULA

A menor unidade que tem todas as propriedades de um determinado composto químico.

LIGAÇÃO QUÍMICA

A força que une os átomos em um composto químico.

Os elétrons se movem em torno do núcleo de um átomo segundo padrões tridimensionais complexos, formando o que chamamos de nuvem de elétrons. A distância média entre um elétron e o núcleo é um fator preponderante na atração núcleo-elétron e da repulsão elétron-elétron, e caracteriza o nível de energia do elétron. Quando vários elétrons apresentam o mesmo nível de energia dizemos que ocupam a mesma camada, ou nível de energia.

A carga elétrica positiva de um próton é igual em intensidade e oposta à carga elétrica negativa de um elétron. No seu estado ideal, um átomo possui igual número de prótons e elétrons, sendo eletricamente neutro. A perda ou captura de um elétron resulta na formação de um átomo eletricamente carregado, denominado **ÍON**. Se a carga é positiva o íon é chamado de **CÁTION**, e se é negativa, de **ÂNION**.

Compostos químicos

Os **COMPOSTOS QUÍMICOS** são formados quando átomos de diferentes elementos químicos combinam-se em uma proporção específica. As propriedades dos compostos diferem muito das propriedades de seus elementos químicos constituintes. Por exemplo, os elementos sódio (Na) e cloro (Cl) são altamente tóxicos, mas o composto NaCl, formado por uma combinação de ambos, é essencial para a saúde humana.

Uma **MOLÉCULA** é a menor partícula que mantém as propriedades de um determinado composto. As moléculas são compostas por átomos de dois ou mais elementos químicos, ou por um grupamento de átomos de um único elemento químico (por exemplo, uma molécula de oxigênio gasoso, O₂, contém dois átomos de oxigênio, enquanto a molécula do dióxido de carbono ou CO₂, outro gás, contém dois átomos de oxigênio e um de carbono).

Ligações químicas

Cada diferente camada ou nível de energia da nuvem de elétrons é ocupada por um número máximo fixo e determinado de elétrons. Quando um nível não se encontra totalmente preenchido, o átomo tende a perder, capturar ou compartilhar elétrons com outros átomos. Estes processos resultam em quatro tipos principais de ligações químicas entre átomos: ligações iônicas, covalentes, metálicas ou de Van der Waals.

Nas **LIGAÇÕES IÔNICAS** a transferência de elétrons produz cátions e ânions, os quais se atraem mutuamente. Compostos formados por ligações iônicas possuem força de ligação e dureza moderadas. O sal de cozinha (NaCl) é formado por ligações iônicas. Quando ingerido, o sal se dissolve formando os íons Na^+ e Cl^- . Os elementos químicos Na e Cl são tóxicos, mas uma solução de seus íons não é. São os íons que produzem o sabor salgado que conhecemos.

Nas **LIGAÇÕES COVALENTES** os átomos compartilham elétrons, e não formam íons. Um exemplo é o diamante, constituído por átomos de carbono unidos por ligações covalentes. Compostos formados por ligações covalentes possuem elevada força de ligação e elevada dureza.

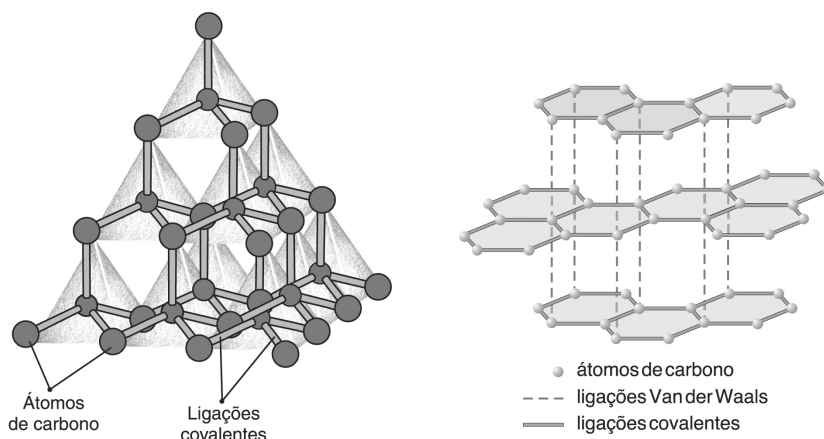


Figura 24: Estrutura cristalina da grafita e do diamante. Os dois minerais são formados apenas por átomos de carbono, organizados em diferentes arranjos geométricos. Na grafita, a ligação entre os átomos de cada placa é covalente, e as placas estão ligadas entre si por ligações de Van der Waals. No diamante cada átomo de carbono está ligado a outros quatro átomos de carbono através de ligações covalentes.

Outro tipo de ligação química é a **LIGAÇÃO METÁLICA**, característica dos metais. Neste tipo de ligação os átomos encontram-se muito próximos uns dos outros, e os elétrons da camada de energia mais alta são compartilhados por diversos átomos, ficando fracamente ligados aos mesmos, e migrando de um átomo para outro. Este tipo de ligação química é responsável pelas propriedades que conhecemos dos metais: são maleáveis e bons condutores de calor e eletricidade. Ouro (Au) e cobre (Cu) são exemplos de metais que ocorrem naturalmente e apresentam ligações metálicas.

LIGAÇÃO IÔNICA

Ligação relacionada à atração eletrostática entre cátions e ânions. Ex.: sal de cozinha, ou cloreto de sódio (NaCl).

LIGAÇÃO COVALENTE

Ligação química em que os elétrons são compartilhados. Este tipo de ligação não produz íons. Ex.: diamante (C).

LIGAÇÃO METÁLICA

Tipo especial de ligação, característica dos metais. Os átomos apresentam-se densamente empacotados, e os átomos do último nível de energia são compartilhados por diversos átomos e encontram-se tão fracamente ligados que podem passar de um átomo para outro. Este tipo de ligação é responsável pelas propriedades que conhecemos dos metais - são maleáveis, opacos e bons condutores de calor e eletricidade. Ex.: ouro (Au), cobre (Cu).

LIGAÇÃO DE VAN DER WAALS

Atração secundária fraca entre certas moléculas, que podem ser facilmente quebradas. Ex: grafita (C).

Existem ainda ligações fracas entre moléculas, denominadas **LIGAÇÕES DE VAN DER WAALS**. Um exemplo importante é a grafita, formada por átomos de carbono assim como o diamante, porém com propriedades físicas bastante diferentes (**Figura 24**).

APLICANDO SEUS CONHECIMENTOS DE QUÍMICA...

Os minerais

Para uma substância ser considerada um mineral, ela deve apresentar cinco características:

- Ser formada naturalmente;
- Ser sólida;
- Ser formada por processos inorgânicos;
- Apresentar composição química específica;
- Apresentar uma **ESTRUTURA CRISTALINA** característica.

ESTRUTURA CRISTALINA

Arranjo interno dos átomos de um mineral, segundo um padrão geométrico definido.

Uma vez que os minerais são formados naturalmente, estão excluídas as substâncias produzidas artificialmente tais como aço, vidro, e outras substâncias produzidas em laboratório que não possuem equivalentes naturais. Os minerais são substâncias sólidas, e, portanto, não devemos considerar como minerais substâncias tais como petróleo e gás natural. O gelo em uma geleira é um **MINERAL**, mas a água de um rio não é considerada um mineral, por autores mais modernos, uma vez que não se encontra no estado sólido (no passado, água e mercúrio em temperatura ambiente eram considerados minerais).

MINERAL

Elementos ou compostos químicos, formados por processos inorgânicos naturais, com uma estrutura cristalina específica.

Os minerais são formados por processos inorgânicos, e, portanto, materiais como folhas ou troncos de árvores estão excluídos. Da mesma forma o carvão, derivado de restos de plantas não é um mineral. Também não são considerados minerais os materiais constituintes de ossos, dentes e carapaças de animais. No caso de fósseis, os materiais originais muitas vezes são substituídos por minerais, e, portanto, formados por processos inorgânicos (Veja mais sobre este assunto nas Aulas 13 e 14).

Os minerais possuem uma composição química específica, sendo constituídos por um elemento ou composto químico. O ouro, por exemplo, é um mineral constituído por apenas um elemento químico (Au). Já o quartzo possui dois elementos em sua composição: silício (Si) e oxigênio (O) na proporção de um para dois (SiO_2). Outros minerais possuem fórmulas mais complicadas, sendo constituídos por diversos elementos, sempre combinados de acordo com proporções definidas. Um exemplo é o mineral olivina, cuja fórmula geral é $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$.

O vidro, mesmo o vidro vulcânico formado naturalmente, não deve ser considerado um mineral, uma vez que não apresenta uma estrutura cristalina característica. A estrutura cristalina corresponde ao arranjo geométrico dos átomos de um mineral obedecendo a distâncias repetidas tanto em linha como em planos (observe novamente a **Figura 24**).

Propriedades dos Minerais

As propriedades físicas dos minerais são determinadas tanto por sua composição química quanto por sua estrutura cristalina. Estas propriedades em geral permitem identificar um mineral sem a necessidade de fazer análises químicas para saber sua composição ou análises de sua estrutura cristalina.

As propriedades mais usadas para identificar os minerais são a cor, forma externa, dureza, brilho, clivagem (tendência a se quebrar formando planos mais ou menos definidos), e densidade.

A **FORMA dos cristais** está relacionada com sua estrutura cristalina. Algumas vezes o cristal é tão simétrico e perfeito em suas faces que parece que foi lapidado. Na maioria das vezes, entretanto, os cristais desenvolvem apenas algumas de suas faces (**Figura 25**).

FORMA OU HÁBITO

Forma externa característica de um mineral.



Figura 25: O mineral pirita (FeS_2), também conhecido como “ouro dos tolos”, apresenta a forma característica de cubos com faces estriadas. Esta forma deriva do arranjo geométrico dos átomos que a compõem (estrutura cristalina).

CLIVAGEM

Tendência do mineral se quebrar em uma ou mais direções preferenciais.

Outra propriedade que resulta da estrutura cristalina de um mineral é a **CLIVAGEM**. Clivagem é a tendência que certos minerais apresentam de quebrar-se segundo planos mais ou menos perfeitos, os quais refletem a existência de planos de fraqueza em sua estrutura cristalina. Um exemplo de clivagem perfeita pode ser visto na Figura 26 onde se pode observar a mica, com sua clivagem em superfícies planas unidirecionais e na Figura 27 onde podemos observar cristais de halita (NaCl) com três direções de clivagem bem definidas. Halita é o nome do mineral que constitui o nosso sal de cozinha. Você pode observar, se tiver a oportunidade de visitar uma salina, que os cubos maiores, quando são quebrados, dão origem a muitos cubos menores. Esta característica se deve ao arranjo dos átomos de sódio e cloro que o constituem (observe novamente a Figura 27). Este arranjo se repete e acaba por constituir a forma externa do mineral.



Figura 26: A mica muscovita apresenta uma clivagem perfeita, que pode ser observada na foto acima pela facilidade com que o mineral é separado em lâminas.

Observe que a clivagem e a forma do mineral resultam de sua estrutura cristalina. A forma externa se desenvolve durante o crescimento do mineral, enquanto que a clivagem é o resultado da quebra do mineral segundo direções bem definidas.

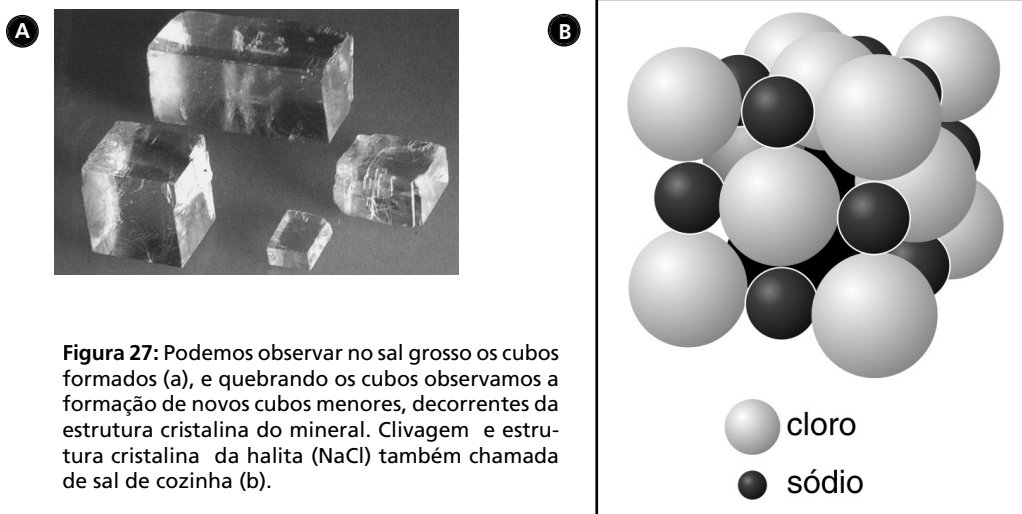


Figura 27: Podemos observar no sal grosso os cubos formados (a), e quebrando os cubos observamos a formação de novos cubos menores, decorrentes da estrutura cristalina do mineral. Clivagem e estrutura cristalina da halita (NaCl) também chamada de sal de cozinha (b).

O termo **DUREZA** se refere à resistência que um mineral oferece ao risco. Está relacionada com a estrutura cristalina e com o tipo de ligação química existente entre os átomos que compõem o mineral. A dureza é uma propriedade relativa, e pode ser determinada pela facilidade com que o mineral é riscado por outro. A escala de Mohs de dureza relativa pode ser usada para determinar a dureza dos minerais, e está dividida em valores de 1 a 10, conforme quadro que se segue.

DUREZA

Resistência que o mineral oferece ao risco.

Quadro1 - A escala de Mohs de dureza relativa dos minerais

| <p>Mais macio</p> <p>↑</p> <p>↓</p> <p>Mais duro</p> | 1 | Talco | Minerais riscados pela unha |
|--|----|---------------------|---|
| | 2 | Gipsita | |
| | 3 | Calcita | |
| | 4 | Fluorita | Minerais riscados pelo canivete |
| | 5 | Apatita | |
| | 6 | Fedspato de potácio | Minerais riscados pelo Quartzo |
| | 7 | Quatzo | Minerais sem traço, quenão são riscados pelo quartzo e são capazes de riscar o vidro. |
| | 8 | Topázio | |
| | 9 | Córinton | |
| | 10 | Diamante | |

A **COR** dos minerais não é uma característica confiável em sua identificação, pois muitos elementos presentes, como impurezas, nas estruturas dos minerais são capazes de alterar completamente a cor dos mesmos.

COR

A cor de um mineral é determinada por vários fatores, sendo a composição química um dos mais importantes.

TRAÇO

Pó do mineral, obtido quando uma placa de porcelana é riscada por ele.

DENSIDADE

Massa por unidade de volume.

ROCHA

Agregado de minerais formado naturalmente.

Muitas vezes, a cor da superfície dos minerais se altera facilmente em contato com o ar. Por isso os geólogos costumam fazer um **TRAÇO** com o mineral em uma superfície de porcelana. A cor do traço, ou do pó fino do mineral deixado sobre a superfície é um importante critério de identificação.

A **DENSIDADE** dos minerais é outra importante propriedade física usada em sua identificação. A densidade é definida como a massa presente em uma dada unidade de volume, sendo em geral expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³). O ouro, por exemplo, apresenta uma elevada densidade (19,3 g/cm³) e parece pesado quando seguramos um pequeno pedaço em nossas mãos. A halita (sal de cozinha), em comparação, possui uma densidade de 2,2 g/cm³, parecendo muito leve para nós.

Os três grandes grupos de rochas

As **ROCHAS** são agregados formados naturalmente, constituídos por minerais, e que podem conter algumas vezes outros tipos de material, como fragmentos de materiais orgânicos ou de vidro vulcânico. Algumas vezes uma rocha é constituída por apenas um mineral, mas neste caso a mesma será formada por muitos grãos individuais do seu mineral constituinte.

As rochas encontram-se classificadas em função dos processos responsáveis por sua formação em três grandes grupos: *ígneas ou magmáticas*, *sedimentares* e *metamórficas*.

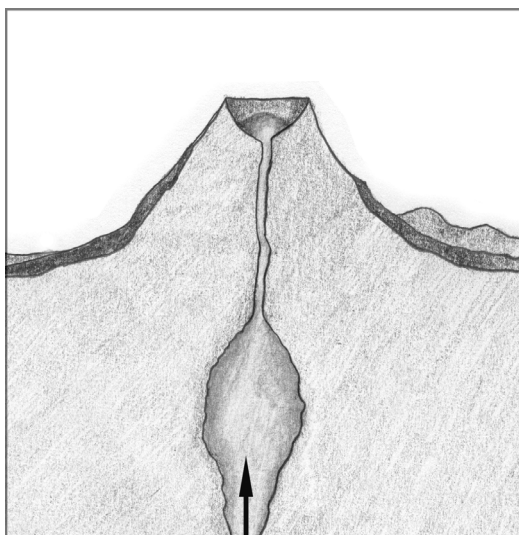
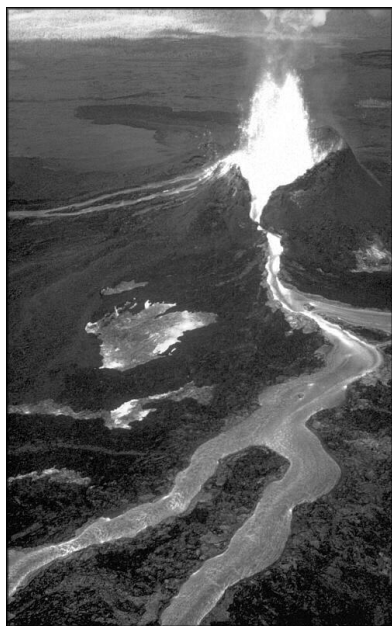


Figura 28: O magma é constituído por rochas parcial ou totalmente fundidas, abaixo da superfície terrestre. Quando o magma entra em erupção na superfície recebe o nome de lava.

Rochas ígneas

Quando um determinado volume de rocha começa a entrar em fusão (o que ocorre em grandes profundidades na crosta terrestre) é formado um magma. O **MAGMA** contém materiais em fusão, grãos de minerais



em suspensão que se cristalizaram diretamente a partir do magma, fragmentos de rochas das paredes do reservatório incorporados ao material em fusão e também gases dissolvidos (Figura 28). Esta mistura é menos densa que as rochas ao redor, e tende a subir em direção à superfície. Quando atinge a superfície ainda em fusão recebe o nome de **LAVA** (Figura 29).

Figura 29: Foto de erupção de lava do vulcão Kilauea, Hawai. A lava saindo do cone do vulcão forma uma série de canais e fluxos.

As rochas **ÍGNEAS** são formadas pelo resfriamento e consolidação do **magma**. A composição do magma (e das rochas magmáticas formadas a partir de sua cristalização) é dominada pelos elementos mais abundantes na crosta: Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, H e O (relembre as aulas 3 e 4). O magma é caracterizado por elevadas temperaturas e por sua capacidade de fluir.

A forma como ocorre o **resfriamento** e a **cristalização** do magma é o fator que distingue os dois principais tipos de rochas ígneas. As **ROCHAS ÍGNEAS VULCÂNICAS** se solidificam rapidamente, na superfície terrestre, enquanto que as rochas ígneas **plutônicas** o fazem lentamente, em profundidade.

Os granitos são **ROCHAS ÍGNEAS PLUTÔNICAS** comuns na crosta continental. Sua coloração em geral é clara, e são constituídas predominantemente por **feldspato**, **quartzo** e **mica**. Outros minerais em geral estão presentes em pequenas quantidades. Os granitos são rochas muito usadas atualmente para bancadas de lavatórios, por sua elevada dureza e pela resistência dos silicatos constituintes a ataques químicos. Estas características determinam um alto valor comercial para este tipo de rocha.

Os basaltos são as rochas ígneas vulcânicas, mais abundantes na crosta oceânica. São rochas escuras, e sua composição química apresenta maiores teores de Fe que os granitos, típicos da crosta continental.

ÍGNEA

(do latim, ignis = fogo)

Rocha formada pelo resfriamento e cristalização de um magma.

MAGMA

Rocha fundida no interior da crosta

LAVA

Magma que chegou à superfície terrestre no estado de fusão.

ROCHA ÍGNEA VULCÂNICA

Rocha formada pelo resfriamento da lava, na superfície terrestre.

ROCHA ÍGNEA PLUTÔNICA

Rocha formada pelo resfriamento do magma, no interior da crosta terrestre.

INTEMPERISMO

Conjunto de processos que resulta na degradação de uma rocha na superfície terrestre.

EROSÃO

Remoção de partículas produzidas pelo intemperismo.

Rochas sedimentares

Quando rochas de qualquer grupo são expostas à ação da atmosfera, tem início um processo de decomposição denominado **INTEMPERISMO** (você vai aprender mais sobre este assunto nas aulas 9 e 10). Esta decomposição resulta na transformação e desagregação do material constituinte da rocha. Posteriormente este material modificado poderá ser removido e transportado pela chuva, vento ou gelo, em um processo denominado **EROSÃO**. Quando as partículas transportadas são finalmente depositadas, o depósito resultante é chamado **SEDIMENTO**. Os sedimentos, eventualmente, transformam-se em **rochas sedimentares** através de diversos processos



Figura 30: Rochas sedimentares no Grand Canyon, Arizona, EUA. Estas camadas registram milhões de anos de história geológica.

de consolidação, conhecidos pelo nome de **DIAGÊNESE**. Os processos diagenéticos incluem a **compactação** (ou reorganização dos grãos pela ação do peso de camadas depositadas sobre os mesmos) e a **cimentação**, que é a formação de minerais nos interstícios entre os grãos, “colando-os” uns aos outros (você vai aprender mais sobre esse assunto nas aulas 11 e 12).

As **ROCHAS SEDIMENTARES** não são tão usadas como material de construção, e por isso são menos familiares para a maioria das pessoas. O modo como se formam resulta em rochas mais macias, que em geral se desagregam mais facilmente do que rochas ígneas e metamórficas. Veja na Figura 30 uma foto de rochas sedimentares do Grand Canyon, Arizona, EUA.

SEDIMENTO

Minerais, fragmentos de rochas e partículas de origem orgânica que foram transportadas e depositadas.

ROCHAS SEDIMENTARES

Formadas na superfície ou próximo à superfície terrestre, por um conjunto de processos chamado diagênese

DIAGÊNESE

Conjunto de processos que transformam um sedimento inconsolidado em rocha sedimentar.

Rochas metamórficas

As **ROCHAS METAMÓRFICAS** são formadas pela recrystalização de outras rochas existentes anteriormente, sejam elas ígneas, sedimentares ou metamórficas. O termo metamórfico vem do grego meta, que significa mudança e morphe, que significa forma. O metamorfismo pode ser definido como um conjunto de transformações mineralógicas, químicas e estruturais que ocorrem nas rochas em profundidades abaixo da região de sedimentação e diagênese.

**ROCHAS
METAMÓRFICAS**

Rocha que foi modificada pela ação de altas temperaturas e pressões.

Esta recristalização se dá pela ação de elevadas temperaturas, altas pressões, ou ambos os fatores. É importante observar que o processo não envolve a fusão do material – neste caso seria formada uma rocha ígnea.

O metamorfismo é uma transformação de um sólido em outro.

A partir da perfuração de poços de petróleo, foi determinado que a temperatura no interior da crosta terrestre aumenta a uma taxa de 30 °C por quilômetro de profundidade. Na profundidade de 5 km a temperatura é de cerca de 150 °C, que é o limite entre as temperaturas dos processos diagenéticos (que transformam sedimentos em rochas sedimentares) e os processos de metamorfismo. Nesta região a pressão é 1500 vezes maior que a pressão atmosférica. O metamorfismo ocorre abaixo de 5 km de profundidade por que tanto a temperatura quanto a pressão são elevadas e permitem que comecem a ocorrer os processos de recristalização dos minerais.

PARA PENSAR...

Se o metamorfismo ocorre em profundidades maiores que 5 km, como é possível a ocorrência de rochas metamórficas na superfície terrestre? Você conhece algum processo capaz de transportar rochas de uma grande profundidade para a superfície?

Entre as rochas metamórficas mais comuns encontramos a ardósia, muito usada para pisos. Esta rocha se forma a partir do metamorfismo brando de rochas sedimentares constituídas por partículas finas. As partículas são recristalizadas, e a rocha apresenta a propriedade de quebrar sempre em planos paralelos. Outra rocha metamórfica muito comum no Brasil é o quartzito conhecido como “Pedra de São Thomé”. Esta rocha é muito usada para pisos ao redor de piscinas, pois é anti-derrapante. O mármore branco, muito usado em bancadas de pias, é também uma rocha metamórfica, formada pelo metamorfismo de calcários (rochas sedimentares constituídas por carbonatos).

Se você não conhece estas rochas, visite uma marmoraria de sua cidade. Observe que a ardósia e o quartzito se quebram com facilidade em planos paralelos, enquanto que o mármore não tem essa característica. Para apresentar uma superfície lisa o mármore precisa ser serrado e polido. Esta estrutura laminar ou folheada, característica da ardósia, do quartzito e de muitas rochas metamórficas, se deve à recristalização sob pressão de minerais do grupo das micas, pouco abundantes nos mármore.

UM DESAFIO...

Nas Aulas 1 e 2 você trabalhou com o ciclo hidrológico, usando caixas para os reservatórios de massa e setas para indicar os processos de transferência de massa entre diferentes reservatórios. As rochas também podem ser vistas como reservatórios de massa, e os processos responsáveis pela transformação de um tipo de rocha em outro podem ser vistos como processos de transferência de massa entre diferentes reservatórios. Tente usar as palavras abaixo para montar o ciclo das rochas (conhecido também como ciclo geoquímico). Você pode começar identificando quais são os processos e quais são os reservatórios de massa. Lembre ainda que um ciclo deve começar e terminar no mesmo ponto.

rocha metamórfica – erosão – magma – intemperismo – rocha ígnea – rocha sedimentar – metamorfismo (ação de altas pressões e temperaturas) – resfriamento – sedimentos – cristalização – transporte e deposição sedimentares – anatexia (fusão) – diagênese

RESUMO

- Elemento químico é a substância mais fundamental na qual a matéria pode ser separada por meios químicos.
- Os compostos químicos são formados quando átomos compartilham elétrons ou quando íons positiva e negativamente carregados se combinam formando moléculas neutras.
- Os principais tipos de ligação química entre os átomos de um composto são: ligação iônica, formada por transferência de elétrons; ligação covalente, formada quando os átomos compartilham elétrons; ligação metálica, formada quando vários átomos compartilham elétrons do nível mais alto de energia; e ligação de Van der Waals, ligações muito fracas entre moléculas.
- Os minerais são substâncias sólidas, formadas por processos naturais, com composição química e estrutura cristalina características.
- Os minerais possuem diversas propriedades físicas que permitem sua identificação. Estas propriedades são consequência da composição química, da estrutura cristalina e do tipo de ligação química entre os átomos.
- As principais propriedades físicas dos minerais são: forma externa, dureza, clivagem, densidade, brilho, traço e cor.
- Os três grandes grupos de rochas são: ígneas, sedimentares e metamórficas.
- As rochas ígneas ou magmáticas são formadas a partir do resfriamento de um magma.
- As rochas sedimentares se formam pela consolidação de sedimentos, em temperaturas e pressões relativamente baixas.
- As rochas metamórficas são formadas pela recristalização de rochas preexistentes, em altas temperaturas e pressões.

EXERCÍCIOS AVALIATIVOS

Verifique se você alcançou os objetivos destas aulas, respondendo às perguntas abaixo. Volte ao texto sempre que precisar. Você pode ainda recorrer aos livros disponíveis no pólo, em especial o livro *Geologia Geral*, José Henrique Popp, Capítulos 2 e 3. Se encontrar dificuldades, procure o tutor da disciplina, no seu pólo.

1. Explique o que são elementos químicos, minerais e rochas.
2. Quais são as características que uma substância deve apresentar para ser considerada um mineral?
3. Grafita e diamante são dois minerais formados apenas por átomos de carbono. Enumere duas propriedades físicas que distinguem os dois minerais.

Por que apresentam propriedades físicas diferentes se possuem a mesma composição química?

4. Quais são os três grandes grupos de rochas? Explique sucintamente os processos responsáveis pela formação de cada grupo.

5. No desafio apresentado no final da aula você representou esquematicamente o ciclo geoquímico das rochas. Você acha que todas as rochas já formadas seguiram exatamente todas as etapas indicadas? É possível uma rocha se formar após apenas algumas das etapas descritas pelo ciclo? É possível desenhar outras setas em sentido inverso?

Leitura recomendada

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p.

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p.

Dinâmica das Paisagens

Neste módulo você vai estudar os processos geológicos que ocorrem na superfície terrestre. A fonte de energia para esses processos é o sol, e o ciclo hidrológico está intimamente relacionado com os mesmos. Inicialmente você vai ver como as rochas se desintegram quando expostas à atmosfera terrestre, dando origem a materiais sob a forma de partículas e materiais dissolvidos. Em seguida, você vai entender as consequências desta desintegração: os fenômenos de formação de solos e erosão. A erosão dos materiais alterados é mais intensa nas regiões de relevo alto, e estes materiais são transportados e depositados em grande parte nas planícies, onde a força das águas que os transportam diminui. Desta forma são gerados depósitos de sedimentos, em diferentes ambientes continentais: fluvial, lacustre, etc. Parte dos materiais alcança o ambiente marinho. Estes sedimentos podem vir a ser soterrados, recobertos por várias camadas de sedimentos ao longo do tempo geológico. Com a pressão exercida pelas camadas superiores, começam os processos de transformação de sedimentos em rochas sedimentares. Este conjunto de processos recebe o nome de diagênese, e será o assunto da última aula deste módulo.

Para melhor compreender o conteúdo deste módulo, você deverá ter alcançado os objetivos das aulas 7 e 8. Sugerimos que você releia o resumo dessas aulas, e lembre ainda os nomes dos minerais mais abundantes nas rochas da crosta terrestre.

Intemperismo e formação de solos

AULAS

9/10

objetivos

Objetivos que você deverá alcançar

- Compreender o que é intemperismo.
- Identificar os principais processos físicos, químicos e biológicos que atuam no intemperismo.
- Reconhecer os fatores que controlam a intensidade desses processos.
- Entender como os solos se formam.

Pré-requisito

Aulas 1, 2, 7 e 8.

Nestas aulas você vai aprender sobre um conjunto de processos que ocorrem em consequência da interação entre a litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera. Estes processos são responsáveis pela degradação das rochas e pela formação dos solos, substratos importantes nos ecossistemas terrestres.

INTEMPERISMO: COMO AS ROCHAS DESINTEGRAM

INTEMPERISMO

Decomposição física e química das rochas expostas ao ar, umidade e matéria orgânica.

O **INTEMPERISMO** ocorre na região onde os materiais da litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera podem interagir, se estendendo desde a superfície até profundidades que variam entre 1 e algumas centenas de metros. Os processos atuantes podem ser físicos, químicos ou biológicos, havendo grande interação entre eles.

Intemperismo físico

As rochas que ocorrem na superfície terrestre são rígidas, e por isso se fraturam quando submetidas a forças de origem tectônica. Quando a **EROSÃO** remove espessas camadas que recobriam uma rocha, o alívio da pressão também pode originar fraturas. O congelamento também pode produzir fraturas, como você pode observar na **Figura 31**.

EROSÃO

Remoção e transporte de partículas produzidas pelo intemperismo.

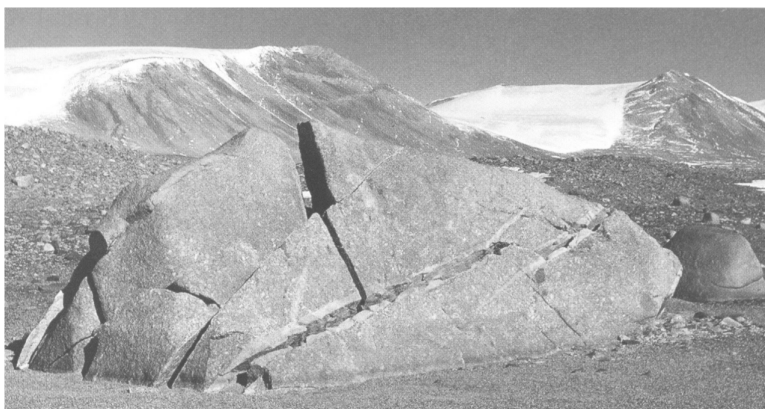


Figura 31: Bloco de gnaiss (rocha metamórfica) com 3 metros de altura, fraturado devido ao congelamento. Taylor Valey, Victoria Land, Antártica. Foto de Michael Hambrey. Fonte: Understanding Earth – 2001 – Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H.Freeman and Company Fig. 6.13, p.129.

Estas fraturas ou juntas vão constituir superfícies novas, expostas ao ar, às águas e aos organismos. Desta forma, facilitam a atuação dos principais processos do intemperismo físico: congelamento da água, cristalização de sais, aquecimento no caso do incêndio de florestas e penetração de raízes.

Quando a água congela, seu volume aumenta em cerca de 9%. É por isso que quando colocamos uma garrafa fechada e totalmente cheia de água no congelador ela pode quebrar. Em regiões onde as temperaturas são muito baixas durante parte do ano, ocorre o congelamento da água no subsolo, incluindo a água presente em fraturas das rochas. O aumento de volume que acontece durante o congelamento produz uma tensão que pode produzir novas fraturas, levando a rocha a uma fragmentação.

Em regiões desérticas, a água que se move lentamente através das fraturas das rochas dissolve materiais solúveis. Esta solução rica em sais dissolvidos eventualmente evapora mais adiante, resultando na cristalização de sais. A tensão produzida desta forma também pode produzir fraturas nas rochas.

O crescimento de raízes de grandes árvores também pode produzir tensões capazes de romper as rochas (Figura 32), especialmente quando fortes ventos fazem as árvores balançarem.

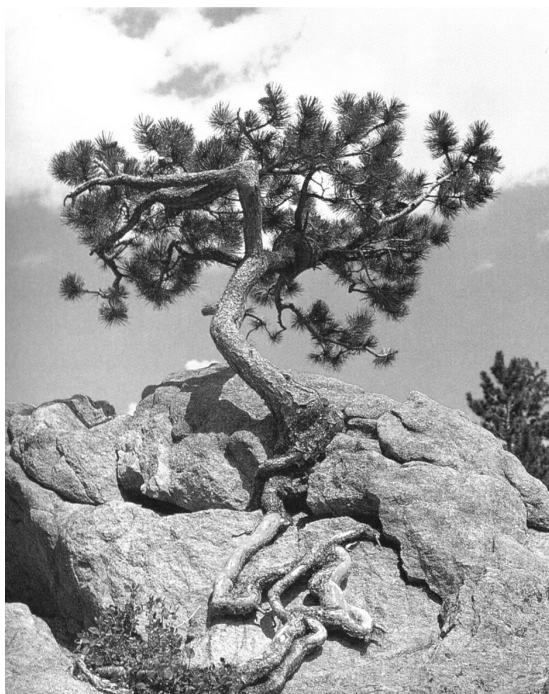
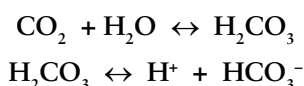


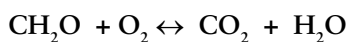
Figura 32: Ação das raízes no intemperismo físico: as raízes da árvore cresceram dentro de uma fratura, provocando o rompimento de um grande fragmento, o qual se separou do restante da rocha, expondo o sistema de raízes. Fonte: *Geology Today – understanding our planet* – 1999 – Bárbara W. Murck e Brian J. Skinner. New York, John Wiley & Sons, INC. pag.195, Fig.7.6.

Intemperismo químico

O intemperismo químico é causado pela água levemente acidificada. Quando as gotas de chuva se formam na atmosfera, elas dissolvem gás carbônico. O resultado é que a água de chuva é uma solução diluída de ácido carbônico! Relembre as reações químicas que ocorrem (você já leu sobre este assunto nas aulas 1 e 2):



A presença de íons H^+ dissolvidos deixa as águas de chuva levemente ácidas. Quando as águas alcançam a camada de folhas em decomposição existente sobre os solos, elas se tornam ainda mais acidificadas, pois incorporam o gás carbônico produzido na decomposição da matéria orgânica (veja a reação que ocorre, com a matéria orgânica representada de forma simplificada pela molécula CH_2O):



Água subterrânea
contendo
substâncias
dissolvidas

As águas de chuva podem ainda se tornar fortemente acidificadas quando interagem com compostos de enxofre e nitrogênio de origem antropogênica (produzidos pelo homem). Neste caso ocorre o fenômeno conhecido como chuva ácida (você vai aprender mais sobre este fenômeno nas aulas 21 e 22).

O processo pelo qual o feldspato (mineral abundante na crosta terrestre, relembre as aulas 7 e 8) se altera durante o intemperismo é semelhante ao preparo do café. Em ambos os processos a água dissolve parte dos sólidos, deixa para trás materiais alterados e produz uma solução contendo substâncias dissolvidas derivadas do sólido original (Figura 33).

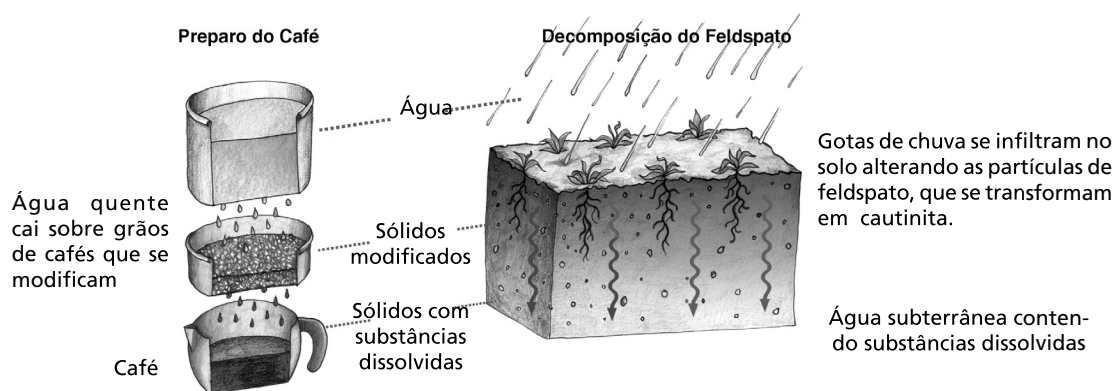
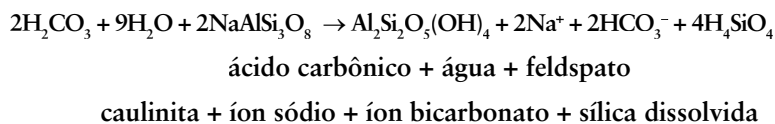


Figura 33: Comparação entre a decomposição do feldspato e o preparo do café.
 Fonte: Understanding Earth – 2001 – Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H.Freeman and Company, Fig.6.4, p.122.

Observe a reação de decomposição do feldspato de sódio (Na) pela ação do ácido carbônico:



A reação produziu substâncias dissolvidas (Na^+ , HCO_3^- e H_4SiO_4) e ainda uma partícula sólida, um novo mineral (caulinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). A caulinita pertence ao grupo dos argilominerais, um conjunto de minerais formados em baixas temperaturas na superfície terrestre, através da decomposição de minerais pré-existent. A **Figura 34** apresenta o processo de decomposição do feldspato.

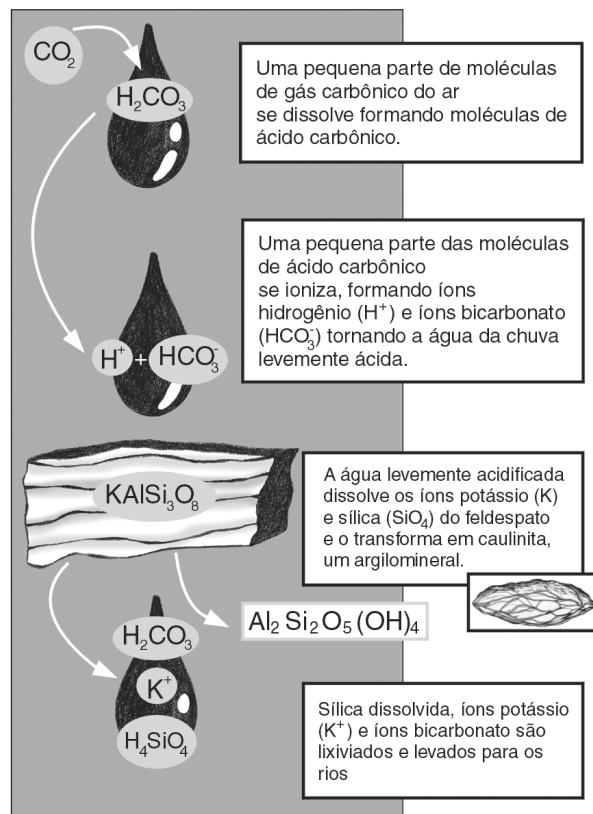


Figura 34: Intemperismo do feldspato em contato com água de chuva contendo ácido carbônico. Neste processo são formados dois produtos: o argilomineral caulinita e uma solução contendo sílica dissolvida, íons potássio e íons bicarbonato. Adaptado de: Understanding Earth - 2001 - Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H. Freeman and Company, Fig.6.6, p.124.

ARGILOMINERAIS

Minerais formados na superfície terrestre, durante a decomposição de minerais preexistentes.

ADSORÇÃO

Ligação eletrostáticas fracas entre íons e a superfície dos argilominerais, que apresentam leves cargas negativas.

Os **ARGILOMONERAIS** apresentam algumas características que os tornam especiais: são compostos pelos elementos Al, O, Si e H, organizados em estruturas em camadas, e tamanho muito pequeno (menor que $2 \mu m$). A superfície de suas camadas apresenta uma leve carga negativa, que os torna capazes de atrair cátions em solução, os quais ficam ligados ao mineral por um mecanismo conhecido como **ADSORÇÃO**.

Este mecanismo é importante, pois dá origem a um verdadeiro reservatório de nutrientes, que fica estocado nos solos e disponível para absorção pelas raízes das plantas.

Alguns minerais se dissolvem totalmente durante o intemperismo. Um exemplo é o grupo dos piroxênios – silicatos de cálcio (Ca), magnésio

(Mg) e ferro (Fe). O ferro dissolvido produzido na reação vai dar origem a óxidos e hidróxidos de ferro (Figura 35). Estes últimos são responsáveis pela cor vermelha dos solos, que podemos facilmente observar quando viajamos pelas estradas do Estado do Rio de Janeiro.

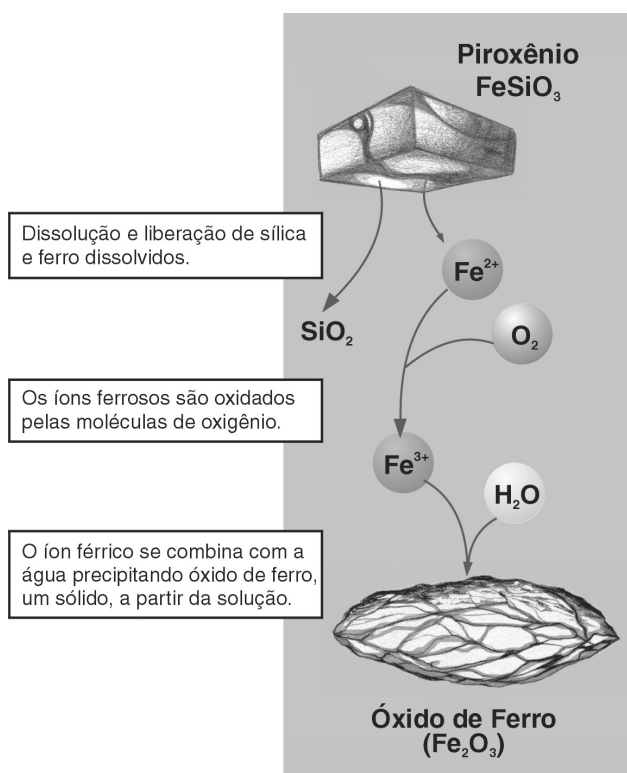


Figura 35: Intemperismo de um silicato de ferro em presença de oxigênio e água. Adaptado de: Understanding Earth – 2001 – Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H. Freeman and Company, Fig. 6.8, p.126.

Fatores que influem nas taxas de intemperismo

As **TAXAS DE INTEMPERISMO** são estimativas da velocidade com que o processo se desenvolve. Diversos fatores influem nestas taxas.

A **composição mineralógica da rocha** é um deles, uma vez que os minerais reagem aos processos de decomposição com velocidades diferentes. O quartzo, por exemplo, é um mineral que se dissolve muito lentamente durante intemperismo, sendo considerado praticamente inerte. Por isso, uma rocha muito rica em quartzo tal como o quartzito (uma rocha metamórfica composta principalmente por quartzo) é afetado pelo intemperismo químico de forma extremamente lenta.

TAXA DE INTEMPERISMO

Tempo necessário para atuação do intemperismo. Em regiões tropicais pode ser da ordem de 1 metro de material alterado por 10.000 anos.

A **estrutura da rocha** também é um fator importante, pois rochas muito homogêneas e com poucas **aberturas para penetração de água** (como um granito com poucas fraturas, por exemplo) sofrerão decomposição mais lenta.

O **clima** está relacionado com a intensidade das chuvas e a temperatura de uma região. Quanto mais altas as temperaturas, e quanto mais altas as taxas de pluviosidade, mais rápidas as taxas de intemperismo. O clima está relacionado ainda com a presença de microrganismos e vegetação, que afetam diretamente o intemperismo químico.

O **tempo** é também um fator importante, pois se os processos atuarem por longos períodos o intemperismo será mais avançado.

Solos: resíduos do intemperismo

LATERIZAÇÃO

Processo típico de regiões tropicais e equatoriais, resultando em solo rico em substâncias insolúveis tais como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

A ciência que trata do estudo dos solos denomina-se **pedologia**; a **edafologia** trata dos solos aráveis.

Vários são os fatores que influem no processo de formação dos solos: clima, rocha matriz, vegetação, relevo e tempo de atuação destes fatores. O fator clima deve ser destacado, pois a mesma rocha poderá formar solos completamente diferentes se decomposta em climas diferentes. Com tantas variáveis influenciando, as classificações dos solos são muito complicadas, e diferem de um país para outro.

LIXIVIAÇÃO

Lemoção de substâncias dissolvidas produzidas pela reação com a água.

Nos climas tropicais, a maior pluviosidade resulta em um processo denominado **LATERIZAÇÃO**, caracterizado por intensa **LIXIVIAÇÃO**. Os metais alcalinos e alcalinos terrosos (recorde a tabela periódica, que você estudou no Ensino Médio) são os primeiros elementos levados pelas soluções, que acabam por dissolver também a sílica. O resíduo resultante é constituído por produtos de baixa solubilidade: alumínio e ferro na forma de hidróxidos. Se a rocha inicial era rica em Al, o produto da laterização recebe o nome de bauxita (grupo complexo de minerais ora amorfos ora cristalinos, cuja composição é o hidróxido de alumínio). Para a formação de um depósito de bauxita, outras **condições** são necessárias além da **rocha pré-existente rica em alumínio** e da **elevada pluviosidade**. A **topografia deve ser suave**, reduzindo ao mínimo a erosão. O material original deve ser poroso para permitir a penetração da água, e deve alternar-se uma estação chuvosa com uma seca. O **tempo** também é um fator importante; estas condições devem perdurar por muitos milênios.

Em climas de menor pluviosidade, ou quando o **tempo** de atuação dos processos de intemperismo é menor, a tendência é ocorrer a formação de silicatos hidratados de alumínio, que são os argilominerais.

Os argilominerais, em consequência de sua estrutura, apresentam uma elevada eficiência para trocar íons com as soluções que entram em contato com os mesmos. Sua presença modifica de forma importante as propriedades físicas e químicas dos solos.

Perfil do Solo

A melhor maneira de iniciar o estudo de solos é encontrar uma seção exposta em um corte de estrada ou cavar uma trincheira para expor diferentes camadas do solo. Uma seção transversal é chamada perfil do solo (Figura 36), e cada camada no perfil é chamada horizonte. Muitos solos têm três camadas maiores ou horizontes: superficial, subsolo e material original. Algumas vezes nem todos os horizontes estão presentes.

Horizonte A: É a camada superficial, em geral de coloração cinza escuro, rico em matéria orgânica, alta atividade biológica, com raízes abundantes e comumente lixiviado. A percolação das águas de chuva promove a **lixiviação** de espécies dissolvidas e também a migração de argilas para o horizonte B, onde ocorre acumulação das mesmas. Por essa razão o Horizonte A muitas vezes é arenoso. Algumas vezes podemos observar uma camada de serrapilheira depositada sobre o horizonte A. Esta camada é chamada de horizonte “O” por alguns autores.

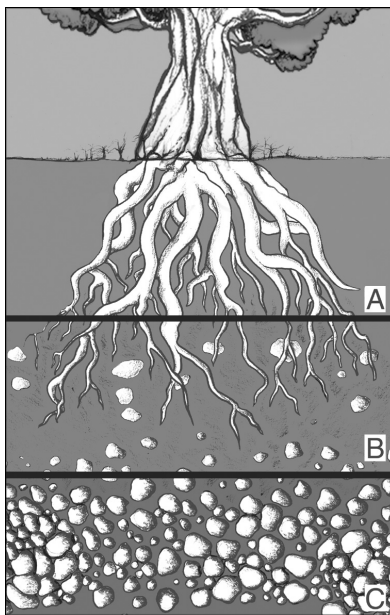


Figura 36: Horizontes do solo formado em clima temperado úmido. Em solos de regiões de clima tropical algumas vezes o Horizonte B não está presente devido à intensa lixiviação resultante das altas taxas de pluviosidade. Adaptado de: Drever, J.I. 1982. The Geochemistry of Natural Waters. Englewood Cliffs, Prentice Hall, Inc. p.139.

Horizonte B: subsolo, em geral de cor marrom ou vermelha, mais argiloso que o horizonte A, poucas raízes; algumas vezes apresenta uma porção inferior mais amarelada e menos argilosa, com menos raízes e menos aeração que acima.

Horizonte C: material original inconsolidado, massa rochosa alterada pelo intemperismo a partir da qual o solo se desenvolve. Não apresenta atividade biológica, podem ocorrer poucas raízes; rocha consolidada.

Cor do Solo

A cor do solo informa sobre a presença de matéria orgânica, drenagem, atividade biológica e fertilidade. Solos com Horizonte A escuro em geral apresentam altos teores de matéria orgânica, e estão situados em áreas com pouca erosão como baixadas e outras áreas de relevo suave. Estes solos apresentam, em geral, alta fertilidade.

Quando o Horizonte B se apresenta escuro também, pode estar relacionado a áreas inundadas, com drenagem ruim. Solos bem drenados em geral apresentam o Horizonte B amarelado ou avermelhado.

Matéria Orgânica do Solo

O conteúdo de matéria orgânica do solo influencia as plantas, animais e populações de microorganismos. A matéria orgânica decomposta fornece muitos dos nutrientes necessários aos organismos presentes no solo. Sem a adição de matéria orgânica não decomposta de tempos em tempos o solo se torna deficiente em nutrientes e sua fertilidade diminui (veja novamente as aulas 1 e 2).

Granulometria do solo

GRANULOMETRIA

Distribuição dos tamanhos das partículas (ou grãos) que compõem um solo ou sedimento.

A **GRANULOMETRIA** do solo é descrita pelos teores de areia, silte e argila (Tabela 5):

Tabela 5: Classificação das partículas do solo de acordo com seu tamanho.

| Fração | Faixa de tamanho |
|--------|------------------------|
| Areia | 2 mm a 63 μ m |
| Silte | 63 μ m a 2 μ m |
| Argila | < 2 μ m |

A granulometria do solo afeta o movimento da água e do ar através do solo, bem como a penetração de raízes. Cada horizonte do solo apresenta uma granulometria diferente. Sua determinação é feita

através de análise por peneiramento, usando-se um jogo de peneiras com malhas conhecidas e regulares. A granulometria do solo, entretanto, pode ser inferida de forma mais rápida.

Faça uma bolinha com um pouco do solo umidecido em sua mão, e aperte entre os dedos. O solo arenoso tende a não formar a bolinha, irá ranger, e se desagrega quando você aperta. O solo siltoso é mais macio, liso, ainda range um pouco e irá formar uma bolinha que se quebra facilmente. O solo argiloso é macio e plástico. Forma uma bolinha que pode ser moldada, e requer mais pressão para formar a bolinha que o solo siltoso.

A granulometria do solo afeta a taxa de percolação da água. O solo arenoso é **POROSO** (muitos espaços entre as partículas) e permeável (os poros são grandes facilitando a passagem da água). Podemos observar estas propriedades quando vemos as ondas do mar se quebrando sobre a areia da praia. A água é rapidamente absorvida. Os solos siltosos também apresentam boa porosidade, sendo sua permeabilidade menor.

Os solos argilosos possuem uma porosidade muito alta (muitos espaços entre as muitas partículas pequenas) sendo, entretanto, muito grande também sua capacidade de reter líquidos (baixa **PERMEABILIDADE**). Poucos poros estão preenchidos por ar e a água fica firmemente aderida ao solo, de forma que pouca água fica disponível para as plantas. Basta observar as poças formadas sobre o barro após a chuva, para perceber a baixa permeabilidade dos materiais argilosos.

POROSIDADE

Propriedade física relativa à proporção de espaços vazios em relação ao volume total de um solo ou sedimento.

PERMEABILIDADE

Propriedade física relacionada à capacidade de permitir a infiltração ou fluxo de água ou outros fluidos.

PARA PENSAR...

Se você gosta de cultivar plantas, certamente já observou que não deve usar substrato (terra) nem muito argiloso, nem muito arenoso. Explique com suas palavras o porquê.

RESUMO

- O intemperismo se estende desde a superfície da Terra até a profundidade em que o ar, a água e os organismos podem penetrar abaixo da superfície.
- O intemperismo físico é a fragmentação mecânica das rochas, causado principalmente pelo congelamento de água ou pela cristalização de sais em fraturas.
- O intemperismo químico envolve a decomposição química dos minerais constituintes das rochas, produzindo substâncias em solução e novos minerais mais estáveis nas condições existentes na superfície terrestre (argilominerais e óxidos).
- A intensidade do intemperismo depende da estrutura e da mineralogia da rocha, do relevo, do clima, da vegetação e da fauna presentes, e do tempo de atuação destes fatores.
- Os solos se formam através do desenvolvimento de camadas ou horizontes, cujas características vão depender do clima, da vegetação, da rocha original, da topografia e do tempo. Em alguns casos nem todos os horizontes estarão presentes no perfil do solo.
- As partículas presentes nos solos são classificadas por tamanho, sendo as menores denominadas argilas ($< 0,002$ mm), silte ($0,002$ a $0,063$ mm) e areia ($0,063$ a 2 mm).
- Os argilominerais são um grupo de minerais formados através de intemperismo químico, os quais possuem, entre outras características, tamanho pequeno, compatível com as argilas. Argila é qualquer partícula sedimentar menor que $0,002$ mm.
- Os solos apresentam camadas sobrepostas, que recebem o nome de horizontes.
- O Horizonte A é o mais superficial, caracterizado pela presença de matéria orgânica e por ser uma zona de remoção de substâncias dissolvidas e argilas pela ação das águas, sendo de modo geral arenoso.

- O Horizonte B é uma zona de acumulação, argilosa.
- O Horizonte C é o mais profundo, constituído pela rocha original parcialmente decomposta.

EXERCÍCIOS AVALIATIVOS

Verifique se você compreendeu bem o conteúdo dessas aulas, respondendo às questões abaixo. Sempre que precisar volte ao texto. Em caso de dúvida, procure o tutor da disciplina, no pólo.

1. Explique a diferença entre intemperismo físico e químico.
2. Dê um exemplo de como o clima pode influir sobre o intemperismo.
3. Qual é a relação entre a presença de CO₂ na atmosfera e o intemperismo químico?
4. Quais são os produtos da decomposição dos feldspatos?
5. Qual é a diferença entre argila e argilomineral?
6. Quais são os horizontes do solo? Descreva-os.

Leitura recomendada

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p. Cap. 10.

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p. Cap. 4.

Sites recomendados

<http://www.eosc.osshe.edu/peers/lessons/soils>

Erosão, transporte, deposição sedimentar e diagênese

AULAS

11/12

objetivos

Objetivos que você deverá alcançar

- Identificar os processos de erosão e transporte sedimentar.
- Reconhecer os principais ambientes de deposição sedimentar (também chamados de ambientes de sedimentação).
- Identificar os principais processos da diagênese.

Pré-requisito

Aulas 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

Nas aulas 9 e 10 você estudou o intemperismo, conjunto de processos responsável pela decomposição das rochas na superfície terrestre. Esta decomposição é consequência da interação entre diferentes geosferas. Os materiais rochosos decompostos podem permanecer no local onde a decomposição ocorreu, e sofrer uma série de outros processos que resultam na formação de um solo. Nas próximas aulas você vai entender que em regiões de relevo montanhoso, a espessura dos solos tende a ser menor, uma vez que outro processo irá atuar com mais intensidade: a erosão.

As mesmas águas de chuva capazes de decompor quimicamente uma rocha, são responsáveis pela remoção física dos detritos gerados. Estes detritos podem ser depositados mais adiante nas planícies, e neste novo local terão início os processos de formação de solos. Quando os detritos são depositados sob a água, como por exemplo, no fundo de lagos, em lugar de ocorrerem processos de formação de solos, ocorrerão processos de um outro tipo: processos diagenéticos. Estes processos, com a sua continuação através do tempo geológico, resultam na transformação dos materiais depositados (sedimentos) em rochas consolidadas (rochas sedimentares).

Nestas próximas aulas você vai aprender um pouco mais sobre os processos de erosão, transporte e deposição sedimentar, e ainda sobre a diagênese.

EROSÃO

Remoção de partículas desagregadas produzidas pelo intemperismo.

FLUXO LAMINAR

Fluxo característico de correntes de baixa velocidade.

FLUXO TURBULENTO

Fluxo característico de correntes de alta velocidade.

EROSÃO E TRANSPORTE DE PARTÍCULAS

EROSÃO é um processo que pode ser definido como a remoção física de partículas produzidas pelo intemperismo. Alguns autores consideram o transporte destas partículas até o local onde serão finalmente depositadas como parte do processo de erosão, outros preferem usar a expressão

TRANSPORTE SEDIMENTAR.

A capacidade dos fluxos de água ou de ar removerem e transportarem partículas depende de sua velocidade e turbulência. Quando o fluxo é muito lento, todas as partículas do fluido se movem em camadas paralelas, e o fluxo é chamado de **FLUXO LAMINAR** (Figura 37). Quando a velocidade aumenta o movimento se torna caótico, com muitos redemoinhos, e é chamado de **FLUXO TURBULENTO**.

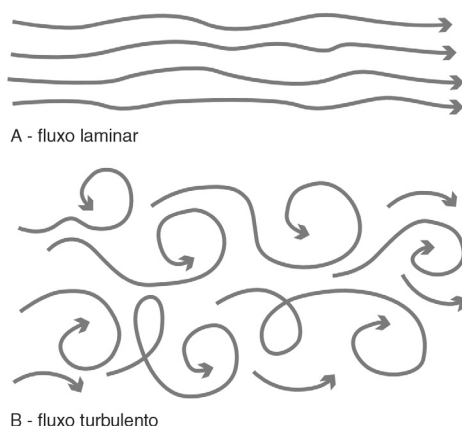


Figura 37: Quando um fluido se move lentamente, suas partículas se movem em camadas paralelas e o movimento é chamado de fluxo laminar (a). Quando a velocidade aumenta o movimento se torna mais complexo e caótico e é chamado de fluxo turbulento (b). Fonte: Geology Today – understanding our planet – 1999 – Bárbara W. Murck e Brian J. Skinner. New York, John Wiley & Sons, INC. pag. 206, Fig.7.18.

A forma como as partículas são transportadas por um rio depende do peso (proporcional ao tamanho) das mesmas e também da velocidade do fluxo. Partículas menores e mais leves como silte e argila (veja as aulas 9 e 10) são comumente transportadas em suspensão, enquanto que as partículas maiores (areia ou seixos) se movem no leito dos rios por um processo chamado de saltação (**Figura 38**).

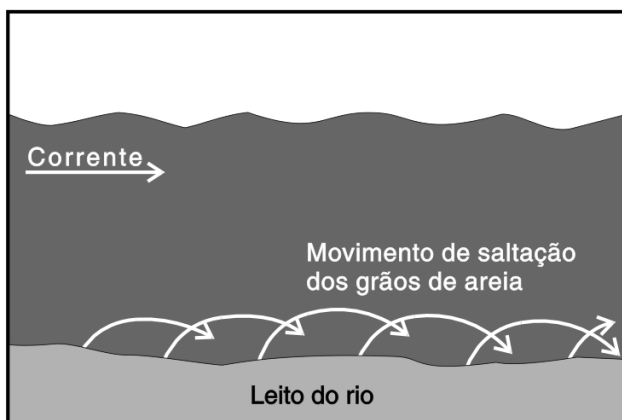


Figura 38: A areia transportada no fundo dos rios se move por saltação. Em locais de fluxo turbulento, ou quando as partículas em suspensão se chocam com as partículas do fundo, os grãos sobem em movimentos em forma de arco, chocando-se com outras partículas do fundo quando caem. Fonte: Geology Today - understanding our planet - 1999 - Bárbara W. Murck e Brian J. Skinner. New York, John Wiley & Sons, INC. pag. 207, Fig.7.19.

A vazão de um rio pode variar ao longo do ano, dependendo das estações (variação **SAZONAL**). Em regiões onde ocorre uma estação chuvosa (verão), em geral a vazão aumenta muito, e com ela a capacidade de transporte de partículas. Você pode observar um exemplo deste fenômeno no Gráfico 2. Esta figura mostra a variação da vazão do Rio Paraíba do Sul entre maio de 1998 e setembro de 1999, apresentada como a linha

SAZONAL

Qualquer fenômeno que varia com as estações do ano (do inglês, season).

pontilhada que aparece no gráfico. A linha cheia representa o conteúdo de material particulado em suspensão (MPS) nas águas do rio, expresso em miligramas por litro. Observe a correspondência quase perfeita entre as duas linhas.

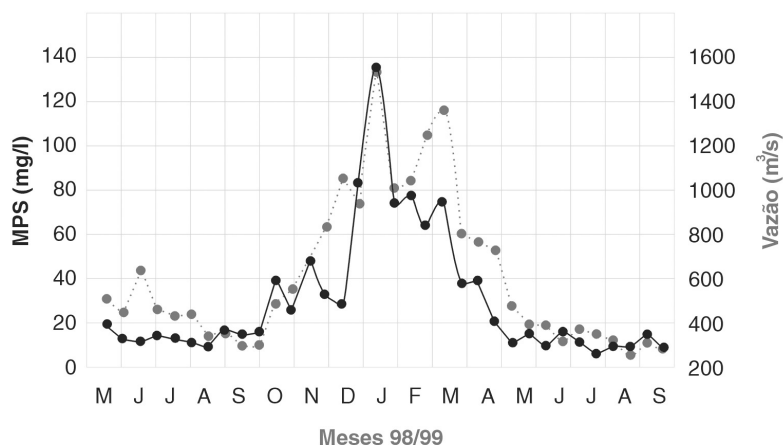


Gráfico 2: Variação temporal da vazão (linha pontilhada) e do material particulado em suspensão (MPS, linha cheia) transportado pelo Rio Paraíba do Sul no período de maio de 1998 a setembro de 1999. Os pontos marcados sobre as linhas representam as datas em que foram feitas as medidas. Fonte: Silva, C.F., 2000 Hidroquímica Fluvial da Porção Inferior do Rio Paraíba do Sul, RJ. Tese de mestrado, CBB, Universidade Estadual do Norte Fluminense.

No período de chuvas (iniciado em outubro de 98) a vazão vai gradualmente aumentando de cerca de 300 m³/s até alcançar valores máximos de até 1600 m³/s em janeiro de 1999. A quantidade de material particulado transportado em suspensão acompanha esta tendência, variando de 20 para cerca de 140 mg/l. Se você conhece o Rio Paraíba do Sul, provavelmente já observou que suas águas ficam de cor marrom no período de chuvas, devido à grande quantidade de partículas em suspensão.

Outros agentes de erosão e transporte de partículas são o vento e o gelo. Como a densidade do ar é muito menor que a da água, sua capacidade de transporte está restrita a partículas pequenas, exceto no caso de furacões, quando a velocidade do vento pode atingir mais de 300 km/h.

A ação das geleiras é restrita às regiões de clima muito frio. Movimentos de massa condicionados pela gravidade são também processos importantes no modelamento da paisagem, atuando em episódios intensos de curta duração como as avalanches, e também em fluxos lentos, que podem ser percebidos apenas se forem observados ao longo de alguns

anos. Na Figura 39 você pode observar diversos indícios do movimento por rastejamento de camadas superficiais do solo.

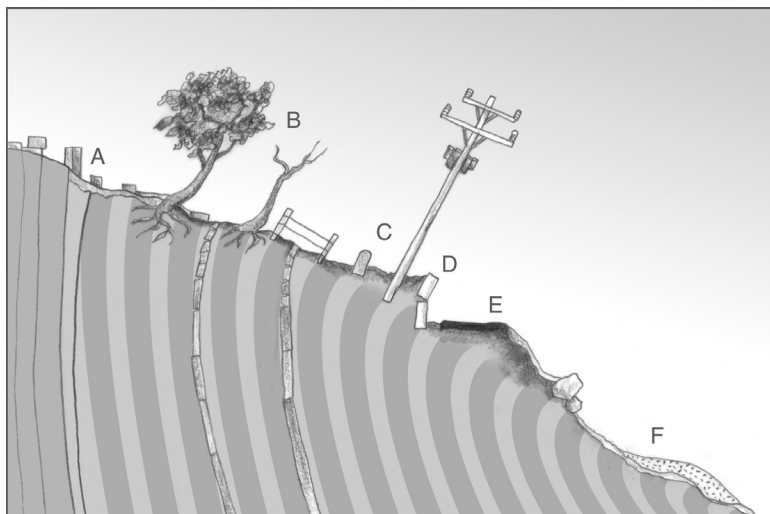


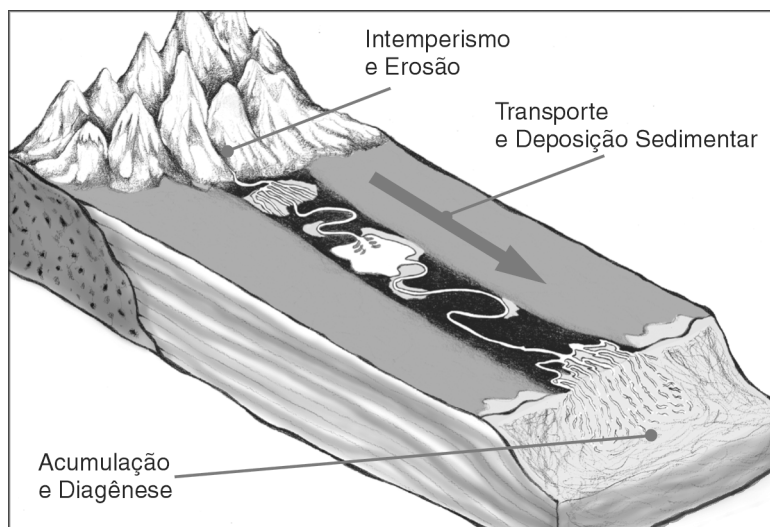
Figura 39: O movimento por rastejamento é maior nas camadas superficiais dos solos das encostas, e sua velocidade pode chegar a poucos centímetros por ano. Vários indícios deste movimento podem ser observados, como o deslocamento de blocos (A), presença de árvores com troncos recurvados (B), deslocamentos de postes, cercas e marcos (C), ruptura de muros (D), alterações no alinhamento de rodovias (E), ocorrência de cascalheiras ou linhas de fragmentos rochosos na base das encostas (F). Fonte: Christofletti, A. 1974 Geomorfologia. São Paulo, Ed Edgard Blucher, Figura 2.1, p. 23.

Diversos fatores afetam a intensidade do processo de erosão. A remoção da cobertura vegetal original, por exemplo, promove o rápido desgaste das camadas superiores do solo, devido à desagregação promovida pela remoção das raízes e ao maior impacto das gotas de chuva sobre o solo desprotegido.

Ambientes de sedimentação

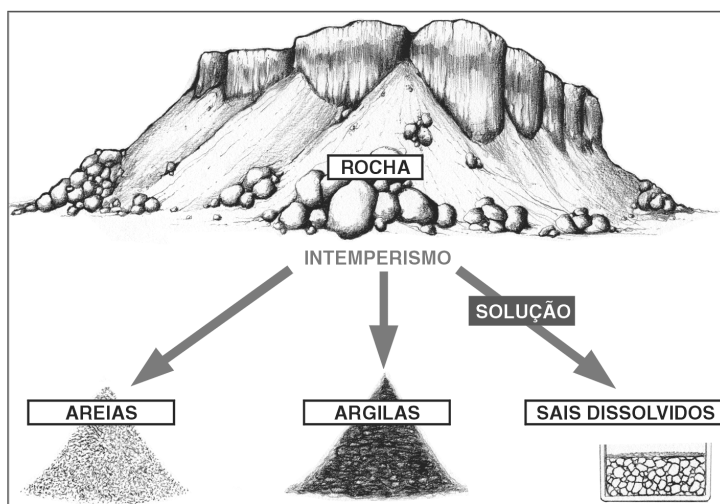
A topografia tem uma importância muito grande na determinação da predominância dentre os processos de intemperismo e erosão, transporte e deposição sedimentar, e ainda acumulação e diagênese (Figura 40).

Figura 40: Os diferentes processos geológicos atuantes na superfície terrestre ocorrem de forma superposta em diversos ambientes. Podemos entretanto indicar na paisagem locais onde alguns deles são predominantes. Adaptado de: Understanding Earth - 2001 - Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H.Freeman and Company, Fig. 6.6, p.124.



Você certamente se lembra (das aulas 9 e 10) que o intemperismo produz três tipos de materiais: fragmentos de minerais não alterados quimicamente, minerais novos formados pela transformação de minerais pré-existentes e substâncias dissolvidas (**Figura 41**).

Figura 41: Os principais produtos do intemperismo: fragmentos de minerais das rochas originais, minerais novos formados pelo intemperismo químico e sais dissolvidos.



Estes materiais, chegando ao ambiente de deposição irão constituir dois grandes grupos de partículas:

- **partículas detríticas:** partículas sólidas originadas fora do local de deposição, englobando os minerais originais não alterados e os novos (principalmente argilomonerais), e

- **partículas de origem química:** formadas perto ou no próprio local da sedimentação, pela precipitação química a partir da reação entre substâncias dissolvidas.

Outro tipo de partícula é ainda encontrado nos diferentes depósitos de sedimentos:

- **partículas de origem biológica,** tais como carapaças e outros restos de organismos.

Os ambientes de deposição sedimentar podem ser classificados como continentais, transicionais e marinhos (**Figura 42**).

SEDIMENTOS DETRÍTICOS

Sedimento formado por partículas produzidas pelo intemperismo e erosão.

SEDIMENTOS QUÍMICOS

Formado pela precipitação química de minerais a partir de soluções naturais como a água de lagos ou do mar.

SEDIMENTOS BIOLÓGICOS OU BIOQUÍMICOS

Sedimentos compostos por restos de plantas e animais.

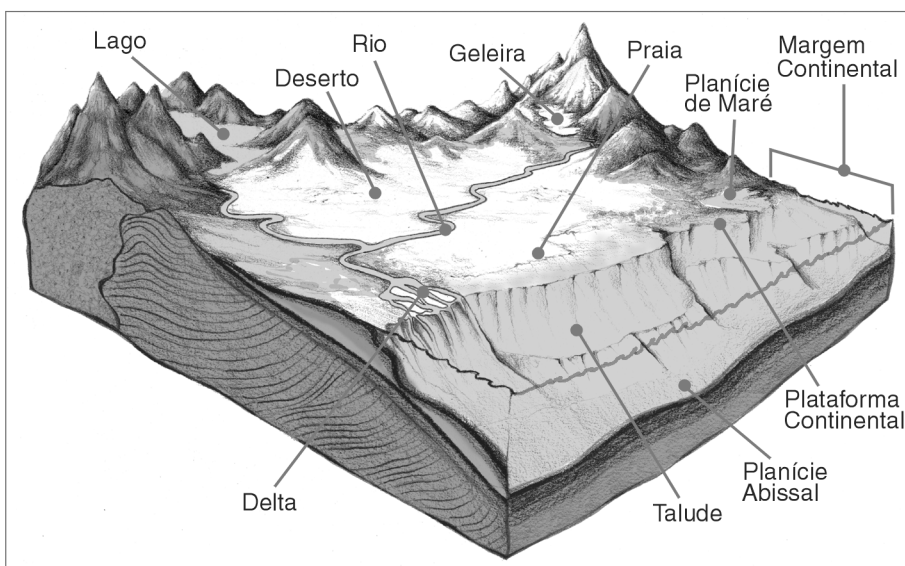


Figura 42: Representação esquemática dos principais ambientes de sedimentação. Adaptado de: Understanding Earth - 2001 - Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H. Freeman and Company, Fig. 6.6, p.124.

Ambientes Continentais

ALUVIAL

Sedimento depositado por um rio.

Entre os principais ambientes continentais destacamos os ambientes **ALUVIAIS**, desérticos e glaciais.

Os **ambientes aluviais** são os associados aos rios, englobando o canal fluvial, suas margens e as planícies de inundação, ocorrendo tanto em climas úmidos como em climas áridos. As partículas de origem biológica são abundantes nos sedimentos finos depositados nas planícies de inundação.

O **ambiente desértico** é característico de climas áridos, onde o transporte de partículas é realizado pelo vento e pela água (quando ocorrem rios, muitas vezes intermitentes), sendo pobres em partículas de origem biológica.

O **ambiente lacustre** é controlado por pequenas ondas e correntes fracas, em corpos de água doce ou salina. Os lagos de água doce são ambientes ricos em partículas de origem química como carbonatos e partículas de origem biológica. Lagos salinos, em regiões desérticas, podem evaporar dando origem a depósitos de sais denominados evaporitos.

O **ambiente glacial** é dominado pelo movimento de massas de gelo, sendo característico de climas muito frios.

Ambientes transicionais

Os ambientes transicionais são aqueles localizados entre os continentes e os oceanos, destacando-se os deltas, as planícies de maré e as praias.

DELTA

Sedimentos depositados na foz de um rio.

Os **deltas** se formam quando os rios entram no mar ou em lagos. A velocidade das correntes fluviais diminui muito nos estuários (região em que as águas dos rios se misturam com as águas do mar), em consequência da ação das marés e correntes marinhas. Com a redução da velocidade, a capacidade de transportar sedimentos diminui, e estes acabam se depositando.

Os ambientes de **planície de maré** são extensas áreas expostas durante a maré baixa, em geral muito ricas em partículas de origem biológica.

Nos ambientes de **praia** ocorrem simultaneamente os processos de intemperismo e erosão proporcionados pelas ondas quebrando na linha de costa, e a distribuição de sedimentos arenosos nas praias pela ação de correntes.

Ambientes Marinhos

Os ambientes marinhos são subdivididos de acordo com a declividade do fundo e a profundidade das águas (**Figura 43**).

A parte mais rasa, até cerca de 200 metros de profundidade, é constituída por uma faixa, ora estreita ora mais larga, acompanhando a borda dos continentes. Esta parte é chamada **plataforma continental**. Apresenta pouca declividade, e constitui um ambiente de deposição e acumulação de partículas detríticas originadas dos continentes. A deposição sedimentar é controlada por correntes marinhas e ocorrem grande quantidade partículas de origem química e biológica, constituídas principalmente por carbonato de cálcio.

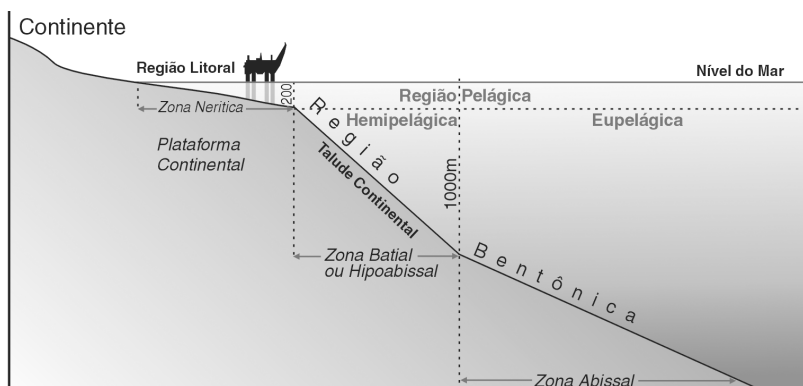


Figura 43: Subdivisões do ambiente marinho. Fonte: Leinz, V. & Amaral, S.E. (1972) Geologia Geral. São Paulo, Companhia Editora Nacional, Figura 8.1B, p. 209.

O **talude** continental é uma região de maior declividade, com profundidade variando em geral entre 200 e 1000 metros, caracterizada por apresentar sedimentos mais finos e mais pobres em partículas de origem biológica. Os deslizamentos do material lamoso do fundo são freqüentes, dando origem a depósitos denominados turbiditos.

Os **ambientes marinhos profundos** são pouco perturbados por correntes marinhas, e incluem **fossas oceânicas** encontradas nas zonas de subducção resultantes do encontro de placas tectônicas (veja as aulas 5 e 6), **cordilheiras meso-oceânicas** e **planícies abissais**.

Acumulação de sedimentos e diagênese: de sedimento a rocha sedimentar

SUBSIDÊNCIA

Movimento relativo de uma porção da crosta que afunda em relação às partes que a rodeiam; é produzido em parte pelo peso de sedimentos acumulados e em parte por processos tectônicos.

ERA PALEOZÓICA

Subdivisão do Éon Fanerozoico, entre 570 e 225 milhões de anos atrás.

ERA MESOZÓICA

Subdivisão do Éon Fanerozoico, entre 225 e 65 milhões de anos atrás.

Conforme a sedimentação (ou deposição sedimentar) ocorre continuamente ao longo do tempo geológico, espessas camadas de sedimentos de vários tipos vão se acumulando, em parte por causa da **subsidência** da crosta. **SUBSIDÊNCIA** é o processo geológico muito lento através do qual grandes porções da crosta “afundam”, seja em consequência do peso dos sedimentos acumulados, seja por causa de movimentos tectônicos.

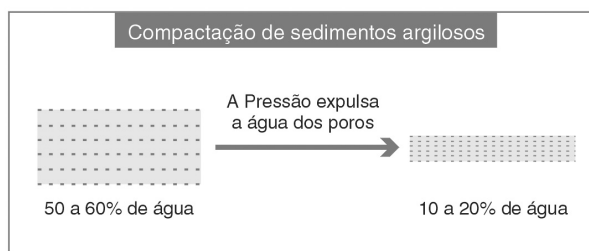
Regiões extensas (pelo menos 10.000 km²) onde a combinação dos processos de subsidência e deposição sedimentar formou uma espessa “pilha” de camadas de sedimentos e rochas sedimentares são chamadas de **BACIAS SEDIMENTARES**. No Brasil existem bacias sedimentares muito antigas, que começaram a se formar na **ERA PALEOZÓICA** (para saber mais sobre este assunto veja as aulas 17 e 18) como a Bacia do Paraná e a Amazônica e bacias sedimentares costeiras, mais jovens do ponto de vista geológico (formadas a partir da **ERA MESOZÓICA**, quando teve início a separação dos continentes Sul Americano e Africano), como as Bacias de Campos e do Espírito Santo.

Após a deposição e contínua acumulação de sedimentos, os sedimentos passam a condições de temperatura e pressão diferentes das condições presentes no ambiente deposicional.

O peso das camadas sobrejacentes resulta em um processo diagenético físico denominado compactação. A compactação é a diminuição do volume e da porosidade dos sedimentos, que se reorganizam em um empacotamento mais denso.

Paralelamente, a água presente nos poros é em parte expulsa (Figura 44).

Figura 44: A pressão resultante do empilhamento de camadas de sedimentos e rochas sedimentares resulta na expulsão de grande parte das águas presentes nos poros dos sedimentos. Fonte: Understanding Earth - 2001 - Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H. Freeman and Company, Fig.7.12, p.155.



A água restante, que fica retida nos poros, irá lentamente reagir quimicamente com os grãos com os quais se encontra em contato, dissolvendo os minerais mais solúveis (Figura 45) e formando novos minerais por precipitação química.

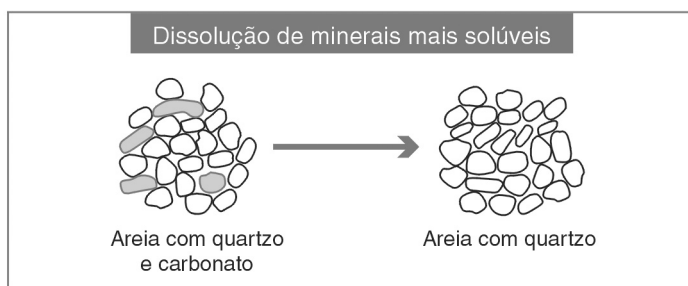


Figura 45: Dissolução de minerais mais solúveis, como por exemplo o carbonato de cálcio, restando os grãos de minerais insolúveis como o quartzo. Fonte: Understanding Earth - 2001 - Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H.Freeman and Company, Fig. 7.12, p.155.

Os novos minerais formados atuam como um verdadeiro cimento, colando os grãos uns aos outros, em um processo denominado cimentação (Figura 46), que diminui a porosidade do sedimento e resulta na formação da rocha sedimentar.

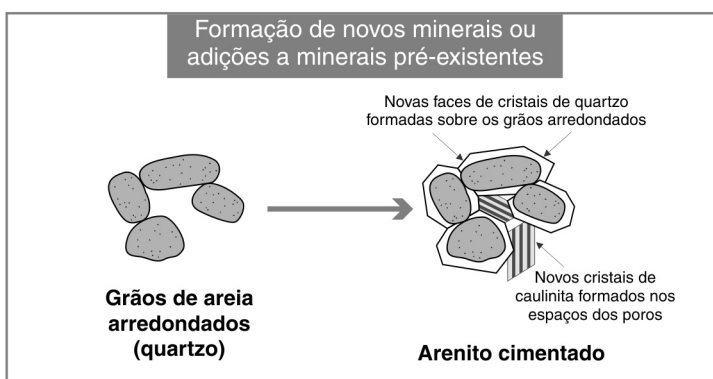


Figura 46: As soluções presentes nos poros dos sedimentos se tornam cada vez mais concentradas em íons dissolvidos. Ocorre então formação de novos minerais, na forma de novos cristais que se desenvolvem nos poros e também como formação de novas faces de cristais na superfície de partículas já existentes. Fonte: Understanding Earth - 2001 - Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H.Freeman and Company, Fig. 7.12, p.155.

RESUMO

- Erosão envolve a remoção e o transporte do material decomposto e desagregado pelo intemperismo.
- As partículas detríticas são fragmentos de minerais produzidos pelo intemperismo, englobando os minerais de rochas pré-existentes e minerais novos formados pelo intemperismo químico. Incluem ainda fragmentos orgânicos, transportados pela ação de águas, do ar ou do gelo.
- Os sedimentos detríticos são classificados de acordo com o tamanho das partículas, da mesma forma que para os solos.
- Nos diferentes ambientes de sedimentação encontramos ainda partículas de origem química e biológica.
- Os ambientes de sedimentação se dividem em continentais, transicionais e marinhos.
- A acumulação de espessas camadas de sedimentos em depressões do relevo acaba contribuindo para a subsidência destas áreas, resultando na formação de bacias sedimentares.
- A acumulação de sedimentos em camadas sobrejacentes exerce uma pressão sobre os sedimentos, a qual, aliada ao aumento de temperatura resulta em um conjunto de processos denominado diagênese.
- Os principais processos diagenéticos são compactação, dissolução de minerais e cimentação.
- A diagênese transforma sedimentos desagregados em rocha sedimentar.

EXERCÍCIOS AVALIATIVOS

1. Quais são os principais tipos de sedimentos?
2. Como se classificam os sedimentos detríticos?
3. Como se formam sedimentos de origem química?
4. De exemplo de um ambiente continental e um marinho onde ocorre deposição de sedimentos de origem química.
5. O que você entende por diagênese?
6. O que é uma bacia sedimentar?

PARA PENSAR...

Cerca de 25 bilhões de toneladas de solos são removidas pela erosão em áreas usadas para agropecuária do mundo todo. O que acontece com estes materiais removidos? E o que acontece com os solos de onde essas partículas foram retiradas? Qual é o horizonte do solo mais afetado?

Leitura recomendada

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p. Cap. 5.

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p. Cap. 7. e 8.

O registro fóssil

Para recordar...

No **Módulo 2** você aprendeu que nosso planeta está longe de possuir uma crosta estável como pode parecer a princípio. Lentos movimentos verticais e horizontais das placas tectônicas resultam na formação de montanhas, na expansão do assoalho oceânico, no deslocamento relativo de grandes porções da crosta e no desaparecimento de materiais anteriormente expostos à superfície, consumidos em zonas de subducção. Estes processos têm sua fonte de energia no interior do planeta, e são responsáveis pela construção do relevo ao longo de **milhões de anos**.

Um outro conjunto de processos se contrapõe aos processos formadores de relevo. Eles estão relacionados à decomposição das rochas na superfície terrestre e à remoção dos materiais desagregados de seus locais originais. Esses materiais se deslocam, remodelando e tornando mais plana a paisagem através de intemperismo, erosão, transporte e deposição sedimentar. Esses processos, que você estudou no **Módulo 3**, têm como fonte de energia o sol. São processos geológicos observáveis em uma escala de tempo de **milhares de anos**.

A acumulação dos sedimentos e sua transformação em rochas sedimentares, através da diagênese, acabam por constituir um registro das modificações ocorridas na superfície terrestre. **O tempo é muito importante para compreendermos a evolução do nosso planeta e das formas de vida nele existentes.**

Introdução ao Módulo

FÓSSEIS

restos de animais ou vegetais, ou evidências de suas atividades biológicas, preservados em rochas.

PALEONTOLOGIA

do grego: palaios (antigo), ontos (ser) e logos (estudo); é a ciência que estuda os fósseis.

ESTRATIGRAFIA

Estudo dos estratos ou camadas de rochas.

Nesse **Módulo 4** você irá aprender que os processos diagenéticos, formadores das rochas sedimentares, nem sempre resultam na destruição dos restos de vegetais e animais presentes nos sedimentos. Alguns destes processos até contribuem para a preservação de **FÓSSEIS**, que podem ser de vários tipos diferentes. Você irá, portanto, aprender algumas noções de **PALEONTOLOGIA**, a ciência que estuda os fósseis. Você irá ainda aprender algumas noções de **ESTRATIGRAFIA**, ciência que estuda as diferentes camadas (também chamadas de estratos) de sedimentos “empilhadas” ao longo do tempo geológico. Essa ciência usa como uma de suas ferramentas a datação absoluta das rochas e procura estabelecer a história geológica da Terra comparando diferentes estratos de rochas, isto é, estabelecendo sua idade relativa. Sendo assim, você vai aprender os princípios básicos das ciências usadas no estudo das Bacias Sedimentares: Paleontologia e Estratigrafia. Você vai entender ainda como os fósseis podem ser considerados registros da evolução dos seres vivos ao longo das Eras geológicas.

**Os processos
diagenéticos e a
preservação de fósseis.
Os principais tipos
de fósseis.**

AULAS

13/14

objetivos

- Compreender a tendência natural de destruição da matéria orgânica sedimentar, e os processos que resultam na preservação de fósseis.
- Identificar os principais tipos de fósseis.

Pré-requisitos

Aulas 1, 2 e 7 a 12

INTRODUÇÃO

DIAGÊNESE

Conjunto de transformações físicas, químicas e biológicas que ocorrem em um sedimento desde o momento em que é depositado e que continuam atuando até sua transformação em rocha sedimentar.

Nessas aulas você verá que imediatamente após a deposição de sedimentos em ambiente aquático tem início a **DIAGÊNESE**. Antes mesmo dos processos de compactação estudados nas aulas 11 e 12, um processo modifica de forma importante o ambiente sedimentar: a decomposição da matéria orgânica.

A preservação de restos e vestígios de vegetais e animais ocorre em condições especiais, que serão estudados aqui.

A **Paleontologia**, como você provavelmente já sabe, é a ciência que estuda os fósseis. A história dos fósseis é também a história da migração dos continentes, das mudanças climáticas, das extinções em massa e das modificações ocorridas na flora e na fauna ao longo do tempo geológico.

Os princípios e métodos da Paleontologia se baseiam em duas outras ciências: a Biologia e a Geologia. A Biologia fornece os subsídios que o paleontólogo busca para estudar os fósseis, já que eles são restos de um antigo organismo vivo. Em contrapartida, a Paleontologia fornece ao biólogo importantes informações, relacionadas ao tempo geológico decorrido a partir de cada uma das diferentes etapas evolutivas dos seres vivos. Por sua vez, a Geologia usa os fósseis como ferramentas para datação e ordenação de seqüências sedimentares, e como base para interpretação de antigos ambientes de sedimentação.

OS PROCESSOS DIAGENÉTICOS

Imediatamente após a deposição em ambiente aquático, várias transformações começam a ocorrer com o material sedimentar. Este conjunto de transformações físicas, químicas e biológicas recebe o nome de diagênese.

Os restos de organismos acumulados nos sedimentos constituem a matéria orgânica sedimentar. Após a morte dos organismos, no ciclo natural de vida, as partes moles entram em processo de decomposição devido à ação das bactérias e as partes duras ficam sujeitas às condições ambientais, culminando com sua total destruição.

A matéria orgânica em decomposição presente nos sedimentos altera a composição química das **ÁGUAS INTERSTICIAIS**, consumindo o oxigênio dissolvido, e enriquecendo-as em nutrientes e gás carbônico. A produção de gás carbônico (CO₂) resulta na formação de ácido carbônico nas águas intersticiais, que se tornam acidificadas (veja novamente as aulas 1, 2, 9 e 10).

ÁGUAS INTERSTICIAIS

Águas presentes nos poros (ou interstícios) dos sedimentos.

O oxigênio é o principal agente oxidante da matéria orgânica. Para muitos tipos de sedimentos, logo abaixo da interface sedimento-água todo ou quase todo o oxigênio dissolvido já foi consumido na decomposição da matéria orgânica (veja a Figura 13.1). Por isso, quanto maior a velocidade de deposição sedimentar, menor o tempo em que a matéria orgânica permanece em contato com o oxigênio, e sua preservação é favorecida. Após o consumo do oxigênio dissolvido, a decomposição da matéria orgânica continua, sob ação de outros agentes oxidantes, porém com menor eficiência. A presença de organismos **BENTÔNICOS** acelera a decomposição da matéria orgânica sedimentar, pois a escavação de buracos favorece a entrada de oxigênio oriundo da coluna d'água.

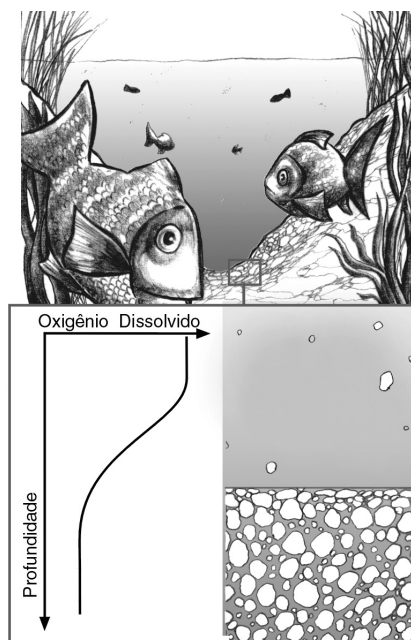


Figura 13.1: Após a morte dos organismos aquáticos ocorre a deposição de seus restos na interface sedimento/água. O processo de decomposição da matéria orgânica consome o oxigênio dissolvido perto dessa interface, nas camadas de água mais próximas ao fundo e nas águas intersticiais dos sedimentos.

A PRESERVAÇÃO DOS FÓSSEIS

Os fósseis podem ser preservados de diferentes modos, dependendo dos fatores ambientais e das substâncias dissolvidas nas águas intersticiais em contato com os mesmos. Os tipos de fossilização podem ser divididos em dois grupos: **RESTOS**, quando alguma parte do organismo ficou preservada, e **VESTÍGIOS**, quando apenas evidências indiretas da presença dos organismos ficaram preservadas, tais como pegadas ou moldes.

Para ser considerado um fóssil, o resto ou vestígio de um organismo deve ter mais de 11.000 anos, que é a duração da época geológica atualmente em curso, o Holoceno (você vai aprender mais sobre as subdivisões do tempo geológico nas aulas 15 e 16). Entretanto, não é necessário que a espécie tenha sido extinta. Muitos vegetais e animais que vivem ainda hoje são encontrados no registro fossilífero, na maioria das vezes em rochas sedimentares, uma vez que essas rochas são formadas em condições de baixas temperaturas e pressões (veja as aulas 7 e 8). Em alguns casos raros, os fósseis são encontrados em rochas metamórficas de baixo grau ou em rochas ígneas vulcânicas.

BENTÔNICOS

Do grego: benthos (profundidade); comunidade de organismos que habita o sedimento aquático ou sua superfície.

RESTOS

fósseis constituídos por partes de organismos.

VESTÍGIOS

evidências indiretas da presença de organismos ou de suas atividades, preservadas em rochas.



Veja no final dessa aula a reportagem publicada na Folha on line, em 11/04/2001, sobre a erupção do vulcão Vesúvio e a preservação de restos de organismos em cinzas vulcânicas. Não esqueça que este é um caso muito raro.



Veja a reportagem do jornal A TARDE on line, de 10/02/2001, no final dessa aula.

MUMIFICAÇÃO

Preservação completa de um organismo.

A coleta e o comércio de fósseis é uma atividade ilegal. A retirada de um fóssil de seu local de ocorrência natural só pode ser feita por um pesquisador, devidamente autorizado, para fins didáticos e para coleções de museus.

Preservação de restos

Os organismos que possuem **partes duras** tais como **conchas, esqueletos ou carapaças** são facilmente encontrados na forma de fósseis, enquanto aqueles que só possuem **partes, moles** são preservados apenas em condições especiais.

Preservação de partes moles

A preservação de partes moles ocorre muito raramente. Podemos citar como exemplo casos de soterramento rápido, ou regiões onde águas subterrâneas ricas em cálcio neutralizam a acidez natural das águas intersticiais, permitindo a preservação de pele, músculos ou órgãos internos de vertebrados.

Os principais processos de preservação total de organismos (partes moles e duras) recebem o nome geral de **MUMIFICAÇÃO**.

Várias espécies de vegetais produzem uma resina denominada âmbar, a qual, quando secretada, pode eventualmente envolver totalmente um inseto, preservando-o (**Figura 13.2**). No filme “Parque dos Dinossauros” este tipo de fóssil foi usado como ponto de partida para criar uma história. Nessa história, os dinossauros foram reconstituídos a partir do DNA obtido de seu sangue, preservado no sistema digestório de um mosquito fóssil encontrado em um nódulo de âmbar.



Figura 13.2: Formação de inclusões orgânicas e inorgânicas em resinas. A exudação de substância resinosa gera uma superfície onde ocorre a aderência de organismos (A), que podem ser totalmente envolvidos após nova exudação (B). Posteriormente, com a morte da planta ou a desagregação de sua superfície, este material será transportado e depositado como uma partícula sedimentar, e durante a diagênese será transformado em âmbar. Adaptado de: Carvalho, I.S. & Carvalho, M.A. (2000), In: Carvalho, I.S. (2000) Paleontologia. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, Cap. 9, Figura 9.1, p.139.

A preservação de mamutes e rinocerontes, congelados em regiões de clima glacial, muitas vezes permite identificar não só tecidos como pele e músculos em perfeito estado, mas também o conteúdo estomacal destes animais, permitindo assim conhecermos seus hábitos alimentares.

Em regiões desérticas também pode ocorrer mumificação, pois a rápida desidratação protege os organismos do ataque de bactérias.

Algumas vezes, os tecidos moles são substituídos por minerais formados durante a diagênese, como carbonatos, sulfetos ou fosfatos. No Brasil encontramos exemplos deste tipo de fóssil na Bacia do Araripe, onde ocorrem numerosos vertebrados, principalmente peixes, além de vegetais e insetos, em nódulos calcários.

Preservação de partes duras

A grande maioria dos fósseis no registro geológico é constituída por partes duras, como conchas de **MOLUSCOS** e **BRAQUIÓPODES**, **carapaças** de **EQUINÓIDES**, dentes e ossos de vertebrados.

MOLUSCOS

O Filo Mollusca é o segundo maior do reino Animal, com mais de 80.000 espécies viventes. De larga distribuição no espaço e no tempo, são registrados continuamente desde o início do Éon Fanerozóico. A maioria das espécies são marinhas, mas muitas espécies invadiram os ambientes de água doce terrestre. São invertebrados, em geral de vida livre, apresentando concha calcária externa.

BRAQUIÓPODOS

Sub classe dos crustáceos, com 800 espécies, principalmente de água doce, existente desde o início do Éon Fanerozóico.

EQUINÓIDES

Classe dos equinodermos, de hábitos bentônicos. Um exemplo conhecido é o ouriço do mar.

FORAMINÍFEROS

Protozoários predominantemente marinhos e bentônicos, com mais de 30.000 espécies, algumas existentes desde o início do Éon Fanerozóico. Formam conchas predominantemente calcárias, que em geral variam entre 0,1 e 1mm.

Dentre as substâncias que constituem as partes duras dos organismos o carbonato de cálcio, CaCO_3 , é a mais abundante, apresentando-se na forma de calcita ou aragonita na grande maioria das conchas marinhas, tais como **FORAMINÍFEROS** (Figura 13.3), corais e esponjas, e ainda na estrutura várias de algas.



Figura 13.3: Constituição (estrutura interna das paredes) da teca dos foraminíferos. Fonte: Vilela, C.G. (2000), In: Carvalho, I.S. (2000) Paleontologia. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, Cap. 11, Figura 11.3, p.161.

DIATOMÁCEAS (Bacillariophyceae)

São algas dotadas de um envoltório silicoso (frústula), que vivem solitárias ou em colônias integrando o plâncton das águas doces, salobras ou salgadas. As diatomáceas mais antigas datam da Era Mesozóica.

Vale a pena recordar que calcita e aragonita são dois minerais com a mesma composição química, diferindo apenas na estrutura cristalina (veja as aulas 7 e 8). A aragonita é um mineral instável, que tende a se recrystalizar na forma de calcita. Por essa razão, os fósseis em geral são constituídos por calcita, seja original ou recrystalizada a partir da aragonita.

A sílica (SiO_2), embora apresente distribuição mais restrita, está bem documentada no registro paleontológico por ser pouco solúvel. Forma a carapaça de **DIATOMÁCEOS** e o esqueleto de **RADIOLÁRIOS** e **ESPONJAS**.

RADIOLÁRIOS

Protozoários exclusivamente marinhos, em geral planctônicos. Possuem conchas que variam entre 0,1 e 0,5 mm, em geral constituídas por sílica.

ESPONJAS

(Filo Porífera)

Animais multicelulares inferiores, incapazes de movimento, na maioria marinha, apresentando estrutura porosa, com muitas aberturas superficiais.

O fosfato de cálcio, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, forma os ossos e dentes dos vertebrados, ocorrendo ainda na carapaça de alguns **CRUSTÁCEOS** e braquiópodos. Sendo pouco solúvel, em geral está bem preservado.

Estas substâncias minerais podem ser preservadas sem alterações. Entretanto, a acidificação das águas intersticiais pode chegar a fazer o carbonato de cálcio de conchas e carapaças dissolver. Outros materiais também podem ser dissolvidos, devido às mudanças ocorridas no ambiente sedimentar.

Muitas vezes ocorre **RECRISTALIZAÇÃO**, que é a transformação de um mineral em outro, sem mudar a composição química (como no caso da aragonita que passa a calcita).

Outro tipo de fossilização comum é a **INCRUSTAÇÃO**. As substâncias transportadas pela água se cristalizam na superfície do organismo, revestindo-a por completo. Este processo ocorre muitas vezes em cavernas. Após a morte do animal, as partes moles desaparecem e os ossos são incrustados por carbonato de cálcio ou por outros minerais.

Em alguns casos, os poros presentes nas partes duras dos organismos são preenchidos por calcita ou outros minerais. Os materiais mais porosos e mais favoráveis à preservação por esta via são ossos e troncos de árvores. Esse processo conhecido como **PERMINERALIZAÇÃO**.

A **CARBONIFICAÇÃO** é o processo que ocorre quando os elementos voláteis da matéria orgânica (oxigênio, hidrogênio e nitrogênio) são gradualmente liberados, restando uma película de carbono. Esse processo é mais comum para restos constituídos por **LIGNINA**, **CELULOSE**, **QUITINA** e **QUERATINA**.

CRUSTÁCEOS

Constituem a Classe dos Artrópodos que é dominante no ambiente aquático, e incluem cracas, lagostins, camarões, caranguejos e afins. Estão representados no registro fóssil desde o início do Éon Fanerozóico.

RECRISTALIZAÇÃO

Transformação de um mineral em outro sem alteração da composição química.

INCRUSTAÇÃO

Cristalização de minerais na superfície de uma estrutura orgânica, revestindo-a.

PERMINERALIZAÇÃO

Preenchimento de poros ou cavidades dos organismos por minerais.

CARBONIFICAÇÃO

Perda gradual dos elementos voláteis da matéria orgânica restando uma película de carbono.

LIGNINA

Polímeros fenólicos que conferem às madeiras muitas de suas propriedades estruturais, cuja decomposição é lenta

CELULOSE

Polissacarídeo constituinte das paredes celulares das plantas.

QUITINA

polissacarídeo estrutural, principal componente das paredes celulares de fungos e de exoesqueletos de insetos e crustáceos.

QUERATINA

Proteínas fibrosas insolúveis presentes em células de origem animal (pele, cabelos, unhas, couros, escamas etc).

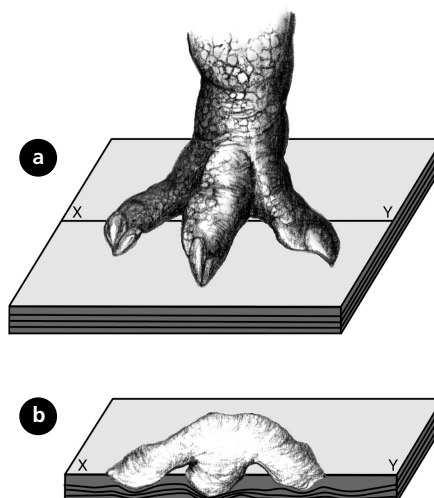


Figura 13.4: Formação de pegadas fósseis, que depende da consistência da consistência do substrato onde o animal caminhava (a), e a pegada produzida (b). Fonte: Carvalho, I.S. & Fernandes, A. C. S. (2000), In: Carvalho, I.S. (2000) Paleontologia. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, Cap. 7, Figura 7.20, p.116.

Preservação de vestígios

MOLDES

Espaço vazio deixado pela dissolução de uma concha.

Algumas vezes os organismos podem deixar registrados nos sedimentos, evidências de sua existência, tais como **MOLDES**, **pegadas** (Figura 13.4), **pistas** ou **perfurações** (Figura 13.5). Em geral, essas evidências são posteriormente preenchidas por outros sedimentos, constituindo um registro importante de sua presença e seus hábitos, ainda que seus restos tenham sido decompostos.

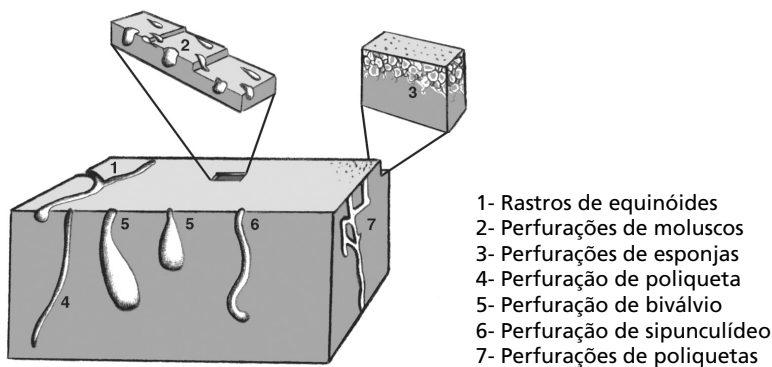


Figura 13.5: Representação esquemática de alguns tipos de vestígios produzidos por organismos bentônicos.). Fonte: Carvalho, I.S. & Fernandes, A. C. S. (2000), In: Carvalho, I.S. (2000) Paleontologia. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, Cap. 7, Figura 7.15, p.112.

A **Figura 13.6** apresenta um esquema da formação de moldes e contramoldes de uma concha. Quando o material constituinte das partes duras se torna instável no ambiente sedimentar, tem início sua dissolução. Se essa dissolução for completa, é deixado um espaço vazio com a forma da concha ou carapaça, onde podemos encontrar um **molde externo** e um **molde interno** da mesma. Nesse espaço, outros íons presentes nas águas intersticiais podem dar origem a novos minerais, os quais se cristalizam, preenchendo totalmente o espaço deixado. A substituição pode se dar de forma gradual, preservando até mesmo o núcleo de algumas células, dando origem a uma réplica do original, que recebe o nome de **CONTRAMOLDE**.

Outros vestígios estão relacionados às atividades vitais dos organismos, destacando-se pistas, tubos e sulcos produzidos por invertebrados nos sedimentos inconsolidados.

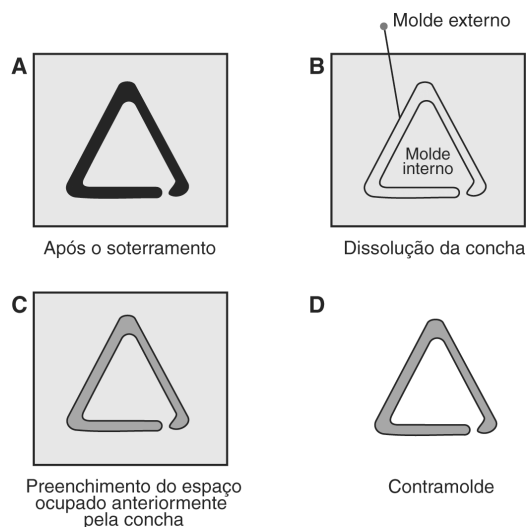


Figura 13.6: Representação esquemática da formação de moldes e contramoldes de uma concha. Fonte: Cassab, R.C.T. (2000), In: Carvalho, I.S. (2000) Paleontologia. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, Cap. 1, Figura 1.3, p.9.

CONTRAMOLDE

Réplica do organismo formada pela cristalização de um mineral no espaço vazio deixado pelo molde.

RESUMO

A decomposição da matéria orgânica sedimentar é um dos primeiros processos diagenéticos, tendo início imediatamente após a deposição dos sedimentos.

As partes moles dos organismos são as primeiras a entrar em decomposição, sendo atingidas depois, mais lentamente, as partes duras.

Algumas condições existentes no ambiente de sedimentação podem resultar na preservação de restos e vestígios de organismos.

Restos são partes dos organismos preservadas do processo de decomposição.

Vestígios são evidências indiretas da presença de organismos, tais como pegadas ou moldes.

Para ser considerado um fóssil o resto ou vestígio de um organismo deve ter idade superior a 11.000 anos.

A preservação de partes moles é mais rara, em geral associada à preservação em âmbar, mumificação por congelamento (clima glacial) ou por desidratação (clima desértico).

Pode ocorrer ainda substituição das partes moles por minerais formados no ambiente sedimentar.

As partes duras dos organismos são em geral constituídas por carbonato de cálcio, sílica ou fosfato de cálcio.

A preservação das partes duras é mais comum, através de recristalização, incrustação (em grutas, revestimento dos organismos por minerais), permineralização (preenchimento de poros por mineral) ou carbonificação (preservação do carbono após perda dos elementos voláteis).

Os vestígios tais como moldes, pegadas e pistas podem ser preservados, em geral associados à dissolução de carapaças e/ou preenchimento de túneis.

EXERCÍCIOS

1. Após a deposição sedimentar, o que acontece com os restos de organismos?
2. Quais são as principais substâncias liberadas e consumidas neste processo?
3. Quais são os dois grandes grupos de fósseis?
4. Como podem ser preservados restos de partes moles?
5. Como podem ser preservados restos de partes duras?
6. Descreva dois tipos de vestígios, explicando como foram formados.
7. Em que tipo de rocha é mais provável a ocorrência de fósseis?

Leitura recomendada

CARVALHO, Ismar S. *Paleontologia*. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2000. Cap. 1-3.

Sites recomendados

UFRGS. Amostra de Vertebrados Fósseis do Sul do Brasil. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/geociencias/paleo/fosseis.html>>. Acesso em: 25 maio 2005.

Site organizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentando fotos de vários fósseis de vertebrados encontrados no sul do Brasil.

FÓSSEIS. Disponível em: <<http://www.geopor.pt/gne/ptgeol/fosseis/fosseis.html>>. Acesso em: 25 maio 2005.

Site apresentando fotos de fósseis de vários tipos, encontrados em Portugal.

NOVA Online. Curse of T.Rex. Disponível em: <<http://www.pbs.org/wgbh/nova/trex>>. Acesso em: 25 maio 2005.

Site com muitas informações sobre a vida dos dinossauros, com muitas fotos de fósseis.

FOLHA ON LINE

11/04/2001 - 18h48

ERUPÇÃO DO VESÚVIO CAUSOU MORTE INSTANTÂNEA EM POMPÉIA

da France Presse, em Paris

Os habitantes da cidade de Pompéia vitimadas pela violenta erupção do vulcão Vesúvio no ano 79 d.C. morreram tão rápido pelo intenso calor gerado que nem tiveram tempo de erguer as mãos em um reflexo de defesa, segundo um estudo publicado na edição de amanhã da revista "Nature".

Especialistas liderados por Alberto Incoronato, da Universidade Federico II, na Itália, desenterraram os esqueletos de 80 das vítimas da erupção e descobriram que os corpos estavam em posições naturais e relaxadas quando morreram.

A morte teria sido causada por uma nuvem de resíduos vulcânicos de temperatura superior aos 500°C, que vaporizou os tecidos das vítimas e cobriu seus restos com cinzas.

Muitos dos habitantes de Pompéia morreram por asfixia, mas os que se encontravam no interior das casas morreram em uma fração de segundo, dizem os pesquisadores. Segundo a investigação, 12 horas depois de iniciada a erupção, uma primeira corrente de cinzas vulcânicas e gases incandescentes caiu sobre a praia de Herculano. Os elementos mais densos como que pararam de avançar, momentaneamente, penetrando como tromba d'água nos abrigos para os quais correu grande parte da população.

As vítimas deviam estar deitadas no solo, devido à violência da erupção. A velocidade de deslocamento e o volume das cinzas incandescentes não lhes permitiram nenhuma possibilidade de sobrevivência.

Numa casa na qual 30 pessoas ficaram enterradas sob a lava, estima-se que seus corpos foram consumidos por oito metros cúbicos de matéria incandescente, vaporizando instantaneamente seus órgãos e fixando seus ossos.

Essa vaporização permitiu que não fossem consumidos completamente, preservando sua posição. Também provocou uma redução momentânea da temperatura, que passou de 500°C a 480°C durante dez minutos. As articulações dos ossos, e até alguns tecidos, esfriaram então e foram recobertos pela cinza, que formou uma espécie de sarcófago.

O estudo dos dentes e dos ossos destes esqueletos permitiu observar as mesmas características encontradas numa incineração: crânios abertos e fraturas transversais enegrecidas pelo calor, fraturas longitudinais dos ossos longos e planos e fissuras no esmalte dos dentes. Estes indícios, associados à análise das telhas encontradas no lugar, permitiram calcular a temperatura reinante no momento da catástrofe.

Não se produziu nenhuma flexão dos membros das vítimas. A posição dos ossos encontrados revela a ausência quase total de gestos de defesa ou sinais de agonia. As leves flexões e crispações observadas nos pés e nas mãos não se devem a reflexos de contração; eles se produziram numa fração de segundo ao contato com o calor, imediatamente antes que a corrente de cinzas os petrificasse em camadas sucessivas.

JORNAL A TARDE

on line, 10/02/2001

VENDA DE FÓSSEIS AINDA É COMUM NA BAHIA

Levi Vasconcelos

Técnicos do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) apoiados por agentes da Polícia Federal apreenderam na manhã de anteontem 120 fósseis que estavam à venda em quatro barracas do Mercado Modelo. A operação deflagrou a campanha para fazer valer uma legislação que existe desde 1942, foi ratificada pela Constituição de 1988, mas até agora nunca foi cumprida. A maioria das peças apreendidas é de peixes fossilizados, mas os comerciantes disseram que ignoravam a proibição do comércio desse tipo de “produto”.

“Realmente a lei é pouco divulgada, tanto que num primeiro momento nossa ação é mais preventiva, no sentido de conscientizar os comerciantes. Depois vamos aplicá-la para valer. A lei é rigorosa. Prevê até prisão de um a quatro anos para os infratores”, disse o chefe-substituto do distrito do DNPM na Bahia, José Lirido. O assunto veio à tona depois que uma emissora de televisão realizou reportagem mostrando o comércio dos fósseis, mas José Lirido garante que a iniciativa foi do órgão. “É uma orientação que se deve estender a todo o País”, observou.

Os quatro que foram notificados fugiram da imprensa, para não dar entrevistas, mas os colegas deles falaram. “Não era um comércio clandestino, tanto é que os fósseis ficavam expostos, em exibição. Eu não vendo, mas o pessoal daqui estava cometendo delito sem saber”, afirmou José Jorge Miranda. “Esse artigo (o fóssil) é vendido no Brasil inteiro. Se acha muito no Rio, em São Paulo e ninguém nunca se incomodou. Só aqui na Bahia é que começou essa perseguição. Eles devem ir buscar os fósseis na origem”, disse o presidente da Associação dos Comerciantes do Mercado Modelo, Evandro Felipe.

CAÇA AO DINOSSAURO - O diretor do Museu Geológico da Bahia, Heli de Almeida Sampaio Filho, admitiu que o problema é nacional e assinalou que o País já perdeu um patrimônio de valor incalculável por permitir tal prática. “É uma grande agressão, no caso do Mercado Modelo, agravada pelo fato de que, além de venderem, ainda expõem”, disse, lembrando que a legislação só permite a exploração e utilização em museus e estabelecimentos de ensino com autorização federal. Ele ressalta que a Bahia tem uma infinidade de áreas de incidência e que carrega-se fósseis de todos os tipos, de mosquitos a restos de animais de grande porte que habitavam o território baiano na pré-história. No Museu, há uma réplica em tamanho natural do mastodonte, o elefante sul-americano.

“Temos aqui quatro mil peças cadastradas, mas esse patrimônio poderia ser bem maior. Até mesmo cientistas de outros Estados levam. Embora os fósseis fiquem em museus mineiros, deveriam estar aqui. Os fósseis nos contam como era o clima e a vida na pré-história. O valor científico e cultural é inestimável”, assinala. A grande esperança de Heli é o convênio que está em vias de ser assinado entre o governo baiano e o DNPM, que permitirá uma ação conjunta visando coibir os abusos. O projeto inclui a realização de pesquisas para se tentar chegar ao primeiro dinossauro baiano.

**Noções de
Estratigrafia. Datação
absoluta e relativa.**

AULAS

15/16

objetivos

- Compreender que os depósitos sedimentares podem atingir milhares de metros de espessura, uma vez que sua acumulação é contínua ao longo do tempo geológico.
- Compreender os princípios fundamentais da estratigrafia e sua importância na interpretação do registro paleontológico do ponto de vista da evolução.
- Conhecer as principais subdivisões do tempo geológico.
- Compreender os princípios em que se baseiam as datações absoluta e relativa.

Pré-requisitos

Aulas 9 a 14

INTRODUÇÃO

Nas aulas 13 e 14 você aprendeu algumas noções de paleontologia, em especial o modo como são formados os diferentes tipos de fósseis, que são restos ou vestígios de organismos presentes em rochas. Quando encontramos um fóssil em uma rocha, sabemos que aquela espécie já existia no momento em que aquela rocha se formou. Se for possível determinar a idade absoluta da rocha em que o fóssil se encontra, podemos dizer com certeza que aquela espécie já existia desde então (talvez já existisse antes, mas certamente não surgiu depois). A identificação do ambiente deposicional associado à acumulação dos sedimentos que deram origem àquela rocha é outra informação importante, pois permite conhecer o ambiente em que aquele organismo vivia.

Agora você vai ampliar seus conhecimentos, compreendendo em que contexto os fósseis são estudados, permitindo a correlação entre diferentes ocorrências de fósseis em rochas de diferentes regiões. Desta forma é possível saber durante quanto tempo (ao longo das eras geológicas) um determinado organismo viveu, como evoluiu o clima em uma dada região do planeta, e como aquele organismo estudado se adaptou (ou não) às mudanças climáticas ocorridas. A ciência que estuda as seqüências de camadas (ou estratos) de rochas é a Estratigrafia, e foi essa ciência que permitiu o estabelecimento de subdivisões do tempo geológico, correlacionáveis e identificadas em todas as partes do nosso planeta.

A DEPOSIÇÃO SEDIMENTAR AO LONGO DO TEMPO GEOLÓGICO

Você já sabe o que é um depósito sedimentar. Pode, portanto, imaginar a formação de um depósito sedimentar como um processo contínuo, que ocorre em uma velocidade que pode ser estimada.

Para entender melhor, vale a pena exemplificar. Se colocarmos uma armadilha de sedimentos (que pode ser apenas um cilindro com fundo fechado, enterrado com a abertura virada para cima) no fundo de um lago (Figura 15.1), podemos, um ano depois, retirá-la e verificar qual é a espessura dos sedimentos acumulados em seu interior.

Claro, podemos imaginar algumas limitações para este tipo de estimativa:

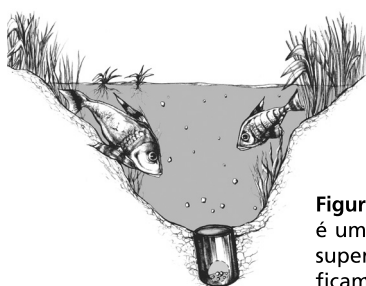


Figura 15.1: Armadilha para sedimentos instalada no fundo de um lago. A armadilha é um cilindro com fundo fechado e parte superior aberta, instalado com a parte superior na altura do fundo (superfície dos sedimentos). As partículas sedimentares ficam retidas dentro da armadilha após a sua deposição.

- poderiam ocorrer variações entre as bordas e o meio do lago, de modo que seriam necessárias várias armadilhas;
- as armadilhas poderiam ser removidas por pescadores ou turistas;
- os sedimentos “capturados” pela armadilha não são removidos de dentro da mesma com a facilidade que os sedimentos “livres” no fundo do lago teriam para deslocar-se para outros locais, levados por correntes etc.

Entretanto, poderíamos estimar grosseiramente a velocidade com que os sedimentos se acumulam no fundo do nosso lago. Estaríamos assim estimando a taxa de sedimentação do nosso lago, provavelmente alguma coisa da ordem de uns poucos milímetros por ano.

Os diferentes ambientes de sedimentação apresentam **TAXAS DE SEDIMENTAÇÃO** variadas, desde uma fração de milímetro/ano em bacias oceânicas até cerca de 2 a 4 centímetros/ano em alguns ambientes costeiros como os manguezais. Existem ainda depósitos que se formam de modo descontínuo, como os depósitos de corridas de lama, formados em consequência de enxurradas.

Para pensar...

Qual seria o tempo necessário para o completo **ASSOREAMENTO** de um lago com 10 metros de profundidade e uma taxa de sedimentação de 2 mm/ano?

A conta é fácil: $t = x/v$ (você ainda lembra da física, do vestibular...)

onde:

Altura do depósito = $x = 10$ metros

Taxa de deposição = $v = 2\text{mm/ano} = 0,002$ metros/ano

Tempo = $t = ?$

Logo: $t = 10 / 0,002 = 5000$ anos

A estimativa de 5000 anos poderá parecer um tempo muito longo. Entretanto, do ponto de vista geológico, é um tempo bastante curto (lembre-se de que a Terra tem 4,6 bilhões de anos).

Após o completo assoreamento do lago, o que aconteceria com o ambiente naquele local? Quais são as mudanças que você poderia prever na fauna e na vegetação?

Se esse lago fosse uma lagoa costeira, seria possível que depois se formasse no mesmo local uma duna? Tente imaginar o conjunto de estratos formados: um estrato de sedimentos lacustres e um de sedimentos eólicos. Cada um desses estratos iria conter restos ou vestígios de diferentes organismos...

TAXA DE SEDIMENTAÇÃO

Velocidade de acumulação de sedimentos (em geral dada em mm por ano).

ASSOREAMENTO

Acumulação de sedimentos no fundo de um corpo de água, reduzindo sua profundidade.

PRINCÍPIO DO UNIFORMITARISMO

JAMES HUTTON 1726-1797

Médico britânico, nunca exerceu a medicina, dedicando-se à pesquisas em diversas áreas, como a agricultura, química, meteorologia e geologia.

Para compreender de maneira lógica as feições observadas na superfície terrestre, os geólogos tomam como base um princípio geral estabelecido desde o século XVIII por um geólogo chamado **JAMES HUTTON**: o princípio do uniformitarismo. Este princípio estabelece que os processos operantes nos sistemas geológicos hoje têm operado de maneira semelhante ao longo do tempo geológico, e pode ser resumido em uma frase: “o presente é a chave do passado”.

As características de uma rocha formada bilhões de anos atrás são semelhantes às aquelas observadas nas rochas em formação nos dias de hoje. Por isso, este princípio, que é básico para todos os ramos da geologia, também se aplica à estratigrafia, que passaremos a estudar.

ESTRATIGRAFIA

Vamos começar buscando a definição de um estrato (do latim, stratum), que é uma camada de sedimentos com características individuais que a distinguem de outras camadas. Estas características, tais como a granulometria, a estrutura e a composição mineralógica, estão relacionadas com o ambiente deposicional.

A estratigrafia é o estudo das seqüências de estratos, possibilitando o estabelecimento das relações entre os mesmos e sua organização em seqüências cronológicas de eventos. Em outras palavras, a estratigrafia nos permite identificar a **IDADE RELATIVA** dos estratos, a idade de um estrato em relação ao outro. Esta identificação é feita com base em três princípios fundamentais.

IDADE RELATIVA

Estabelecimento da ordem em que dois eventos ocorreram, sem determinar a idade (em anos) de cada um.

- O primeiro é o **princípio da horizontalidade original**, que estabelece que **sedimentos depositados em meio aquoso são depositados originalmente na forma de estratos horizontais**. Você pode facilmente testar este princípio: basta misturar em uma garrafa água e sedimentos. Após alguma agitação, deixe a garrafa em repouso, e você verificará a formação de uma camada horizontal no fundo.

- O **princípio da superposição das camadas** é o segundo princípio fundamental da estratigrafia, e estabelece que **em uma seqüência não perturbada de estratos cada estrato é mais novo que o estrato situado abaixo dele mesmo**. Podemos assim determinar a **idade relativa** dos estratos, saber em uma seqüência qual é o estrato mais jovem e qual é o mais antigo, mas não podemos determinar a idade absoluta dos estratos (Figura 15.2).

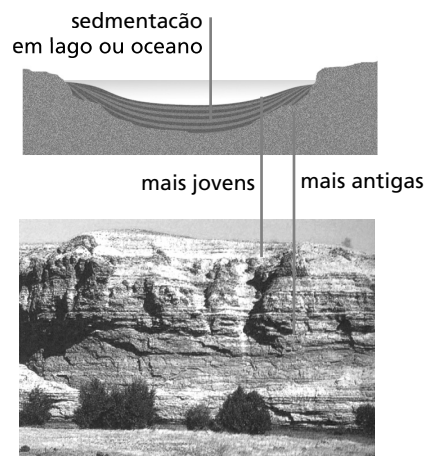


Figura 15.2: Os princípios da horizontalidade original e da superposição das camadas. Os sedimentos são depositados em camadas horizontais e lentamente se transformam em rochas sedimentares. Se as rochas permanecem não perturbadas por processos tectônicos, as camadas continuam horizontais, e sua idade relativa é a mesma dos sedimentos originais: a mais antiga no fundo e a mais jovem no topo. Na foto, camadas de rochas sedimentares não perturbadas, Colorado, USA. (Jim Steinberg/Photo Researchers). Fonte: Understanding Earth – 2001 – Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H.Freeman and Company Fig. 9.3 p. 190.

- O **terceiro princípio** diz respeito aos organismos, e é o princípio da **sucessão faunal: as populações de organismos evoluem no tempo e as formas anteriores não voltam a aparecer**.

A correlação entre as seqüências de estratos pode ser feita mesmo para rochas separadas por grandes distâncias. Características como a composição mineralógica da rocha, estruturas sedimentares, presença de fósseis e a correspondência na seqüência dos estratos permitem a correlação (Figura 15.3)

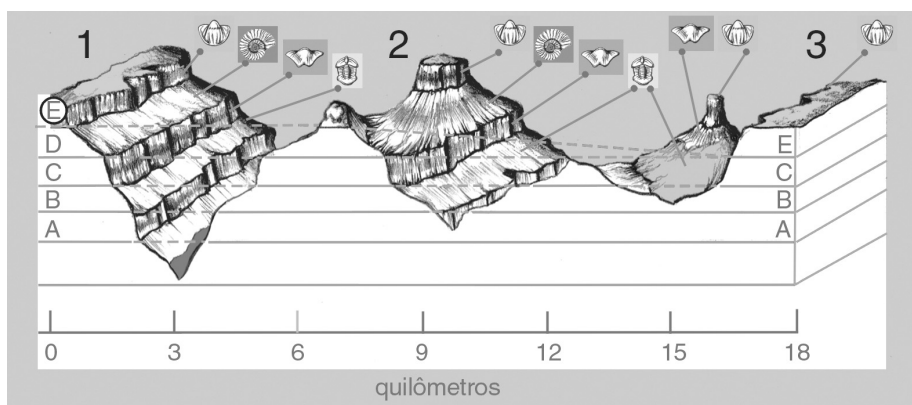


Figura 15.3: Correlação de estratos expostos em três locais (1, 2 e 3), afastados por alguns quilômetros, com base na seqüência de rochas e fósseis. Observe que no local 3 o extrato D não aparece, e E está depositado diretamente sobre C. É possível que D nunca tenha sido depositado naquele local, mas também é possível que tenha sido removido pela erosão após a deposição. Adaptado de: *Geology Today – understanding our planet – 1999* – Bárbara W. Murck e Brian J. Skinner. New York, John Wiley & Sons, INC pag. 63, Fig.3.6.

No estabelecimento das idades relativas dos estratos são ainda consideradas outras relações. Por exemplo, quando uma feição geológica corta outra, a feição “cortada” é a mais antiga. Veja por exemplo a seqüência de estratos da **Figura 15.4**, onde uma falha corta uma seqüência de estratos horizontais: fica claro que a falha ocorreu depois da deposição dos estratos.

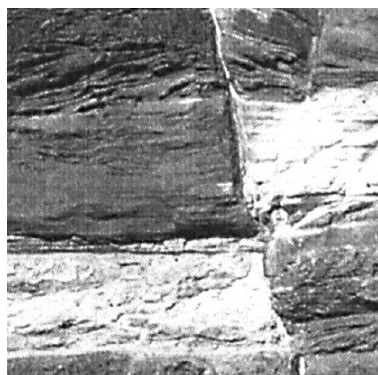


Figura 15.4: Nesta foto as fraturas são mais recentes que os estratos cortados por elas. Seqüência de estratos de arenito em Merseyside, UK. O estrato de arenito branco tem aproximadamente 30 cm de espessura. Fonte: *Geology Today – understanding our planet – 1999* – Bárbara W. Murck e Brian J. Skinner. New York, John Wiley & Sons, INC pag. 60, Fig.3.3.

DISCORDÂNCIA

Superfície entre duas camadas de rochas sedimentares formadas de modo descontínuo, isto é, a superior foi depositada após um intervalo de tempo em que ocorreu erosão de uma ou mais camadas de rocha.

Algumas vezes a história geológica de uma seqüência de estratos inclui períodos em que ocorreu erosão parcial ou total, de um ou mais estratos. Será formada desta maneira uma superfície de erosão, ou **DISCORDÂNCIA** sobre a qual será posteriormente depositada outra seqüência de estratos (**Figura 15.5**).

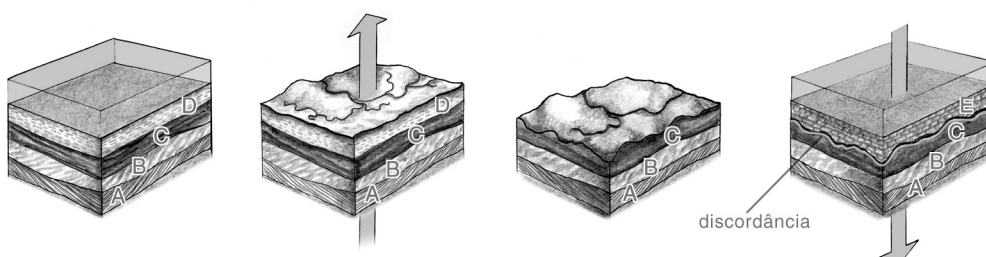


Figura 15.5: Seqüência de eventos dando origem a uma seqüência de estratos truncada por uma discordância: 1 – Sedimentação das camadas A, B, C e D, sob o mar; 2 – Movimento tectônico com elevação do conjunto acima do nível do mar, e exposição de D à erosão; 3 – Erosão contínua elimina D e expõe C à erosão; 4 – Novo evento tectônico, com subsidência do conjunto abaixo do nível do mar e sedimentação da camada E. Fonte: Understanding Earth – 2001 – Frank Press & Raymond Siever. New York, W.H.Freeman and Company Fig. 9.6 p. 193.

Como um novo exemplo, procure identificar no bloco diagrama da **Figura 15.6** a seqüência de eventos descrita a seguir:

- Deposição uma camada de sedimentos lacustres (A).
- Deposição de uma camada de sedimentos eólicos (B, uma duna depositada pelo vento após o assoreamento da lagoa).
- Após uma elevação do nível médio do mar, os sedimentos da camada B são recobertos por sedimentos marinhos carbonáticos, típicos de plataforma continental (formando a camada C).
- O nível médio do mar abaixa novamente em consequência de um novo período glacial. Os sedimentos da camada C ficam expostos ao ar e são parcialmente erodidos.
- Deposição de nova camada de sedimentos eólicos, formando a camada D.
- Movimentos tectônicos geram uma falha geológica.
- Formação de uma nova superfície de erosão

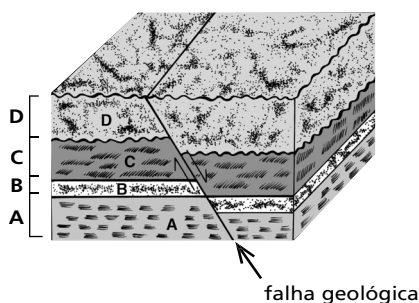


Figura 15.6: Bloco diagrama ilustrando uma seqüência de eventos imaginária: deposição uma camada de sedimentos lacustres (A); deposição de uma camada de sedimentos eólicos (B, uma duna depositada pelo vento após o assoreamento da lagoa); após uma elevação do nível médio do mar, os sedimentos da camada B são recobertos por sedimentos marinhos carbonáticos, típicos de plataforma continental (formando a camada C); o nível médio do mar abaixa novamente em consequência de um novo período glacial e os sedimentos da camada C ficam expostos ao ar e são parcialmente erodidos; deposição de nova camada de sedimentos eólicos, formando a camada D; movimentos tectônicos geram uma falha geológica; formação de uma nova superfície de erosão.

DATAÇÃO ABSOLUTA E RELATIVA

DATAÇÃO ABSOLUTA

Determinação da idade em anos.

ERNEST RUTHERFORD (1871-1937)

Nasceu na Nova Zelândia onde trabalhou como agricultor, e depois se formou em física. Complementou seus estudos na Universidade de Cambridge, Inglaterra.

Éon FANEROZÓICO

Relembre, das aulas 3 e 4, que o éon Fanerozóico iniciou há 570 milhões de anos atrás.

ISÓTOPOS

Átomos com o mesmo número atômico e diferentes números de massa.

Quando você determina que um estrato é mais antigo que outro, você está fazendo uma **datação relativa**, isto é, está comparando a idade dos estratos, sem determinar a idade absoluta de cada um. É como saber que a primeira guerra mundial ocorreu antes da segunda, mas sem ter noção das datas em que cada uma dessas guerras começou ou terminou, ou qual o período de tempo decorrido entre elas.

No início do Século XX, um físico chamado **ERNEST RUTHERFORD** sugeriu que a radioatividade poderia ser usada para estimar a idade absoluta das rochas, e foi o primeiro a determinar a idade de um mineral contendo urânio em seu laboratório. Depois dele, muitos outros pesquisadores desenvolveram e aprimoraram métodos de datação de rochas baseados na presença de elementos radioativos nas mesmas. Foi com base nestes resultados que se determinou a idade da Terra, a qual tem cerca de 4,6 bilhões de anos de idade. Foi ainda com base nestes resultados que se determinou a duração do **Éon FANEROZÓICO**, o qual teve início pouco mais de meio bilhão de anos atrás.

Mas como é que os geólogos usam a radioatividade para datar rochas?

O núcleo de átomos radioativos se desintegra espontaneamente, formando um átomo de um elemento diferente e emitindo radiação. Os geólogos chamam o átomo que se desintegra de átomo pai. O produto do decaimento é chamado de átomo filho.

Você se lembra das Aulas 7 e 8 que os átomos possuem um núcleo constituído por prótons e nêutrons e uma nuvem de elétrons negativamente carregados. Os átomos de um mesmo elemento podem possuir diferentes números de nêutrons; as diferentes versões para cada elemento são chamados **ISÓTOPOS**. Alguns elementos possuem isótopos cujos núcleos não são estáveis, estando sujeitos a transformações. Estas transformações são chamadas de decaimento radioativo, já que os núcleos se modificam emitindo radiações na forma de partículas ou ondas eletromagnéticas. Muitas vezes os isótopos radioativos de um elemento se transformam em isótopos de outro elemento.

Através do decaimento radioativo, um isótopo pai dá origem a um isótopo filho. Esta transformação pode acontecer de diferentes maneiras. Por exemplo, pode ocorrer a transformação de um próton em nêutron, seja pela emissão de uma partícula sub-atômica, ou pela captura de um elétron para dentro do núcleo.

O decaimento não acontece de forma simultânea para todos os átomos de um elemento radioativo. Uma certa quantidade de isótopos pais está sempre decaindo, dando origem a isótopos filhos. Este decaimento acontece em uma proporção fixa, chamada taxa de decaimento, que não depende de temperatura, pressão, ou da presença de outros elementos químicos.

As taxas de decaimento radioativo são em geral apresentadas na forma de **MEIA-VIDA** do elemento, que é o tempo necessário para a metade do número original de átomos decair (**Figura 15.7**). A meia-vida dos elementos usados para determinar a idade das rochas varia desde milhares até bilhões de anos.

MEIA-VIDA

Tempo necessário para que metade dos átomos radioativos decaia dando origem a novos átomos.

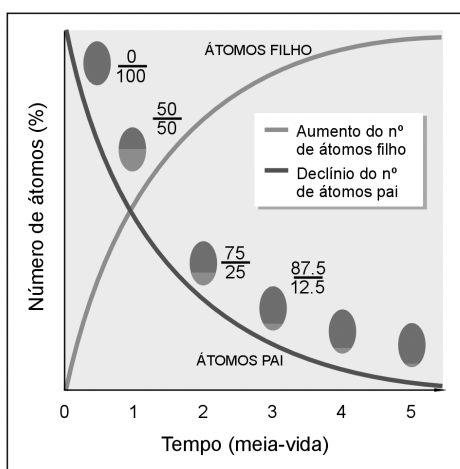


Figura 15.7: Gráficos ilustrando o decaimento radioativo. A linha verde corresponde à quantidade de átomos pai, indicada como porcentagem no denominador da fração, referente ao eixo y. A linha cinza corresponde à quantidade de átomos filho produzidos, também em porcentagem em relação ao total, registrados no numerador da fração. O eixo x apresenta o tempo, e a unidade usada é a meia vida do par de isótopos pai e filho. Após um intervalo de tempo igual a uma meia vida, 50% dos átomos do isótopo pai se transformaram em átomos do isótopo filho. Após o segundo intervalo de tempo correspondente à meia vida, os 50% de átomos pai restantes caem à metade novamente: o resultado é que 75% dos átomos terão decaído e formado isótopos filho, restando ainda 25% de átomos do isótopo pai. Em qualquer tempo, o número total de átomos corresponde ao número inicial de átomos pai. Adaptado de: *Geology Today – understanding our planet* – 1999 – Bárbara W. Murck e Brian J. Skinner. New York, John Wiley & Sons, INC pag. 70, Fig.3.12.

Quando um mineral é formado, se um isótopo radioativo for incorporado à sua rede cristalina, no mesmo momento terá início o decaimento do isótopo. Após um período de tempo correspondente à meia-vida do isótopo estudado, a quantidade de átomos do isótopo pai cai à metade. Quando houver decorrido o segundo período de tempo correspondente à meia vida do isótopo, o número de átomos do isótopo pai terá diminuído para a metade da metade (veja outra vez a **Figura 15.5**).

Se a taxa de decaimento (meia-vida) for conhecida, e se for possível medir as quantidades de isótopos pais e de isótopos filhos formados, poderá ser calculado o tempo decorrido desde a formação do mineral contendo o isótopo radioativo.

Os geólogos contam a quantidade de isótopos pai e filho em um mineral usando um espectrômetro de massa, que é um instrumento muito sensível, capaz de detectar quantidades mínimas de átomos. Os isótopos mais usados estão na **Tabela 15.1**. A escolha do método mais adequado depende da presença do isótopo radioativo na rocha (mesmo que seja em quantidades mínimas) e também da idade da rocha.

Tabela 15.1: Principais isótopos usados para datações radiométricas

| Isótopos | | Meia vida (anos) | Idades possíveis para datação (anos) | Materiais que podem ser datados |
|-------------|---------------|------------------|--------------------------------------|---|
| Pai | Filho | | | |
| Urânio-238 | Chumbo-206 | 4,5 bilhões | 10 milhões a 4,6 bilhões | Rochas ígneas |
| Potássio-40 | Argônio-40 | 1,3 bilhões | 50.000 a 4,6 bilhões | Rochas ígneas ou metamórficas |
| Rubídio-87 | Estrôncio-87 | 4,7 bilhões | 10 milhões a 4,6 bilhões | Rochas ígneas ou metamórficas |
| Carbono-14 | Nitrogênio-14 | 5730 | 100 a 70.000 | Madeira, ossos, dentes, conchas, gelo contendo CO ₂ dissolvido |

O carbono-14 é usado especialmente para datar materiais orgânicos tais como conchas e madeiras presentes em sedimentos geologicamente jovens, pois estes materiais contêm carbono, incluindo pequenas quantidades de carbono-14. Seu uso é limitado a materiais com idade máxima de 70.000 anos. Para conhecer a idade de fósseis mais antigos, portanto, é necessário determinar a idade das rochas em que os mesmos ocorrem, usando métodos que em geral combinam datação absoluta e relativa.

UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS

Você já sabe o que é estratigrafia, e como podemos estudar a idade relativa e a absoluta de estratos ou camadas de rochas. Para efeito de estudo e referências, os pacotes rochosos são subdivididos em unidades, denominadas unidades estratigráficas. Existem três tipos principais de unidades estratigráficas:

- **litoestratigráficas** (delimitadas por critérios litológicos, isto é, relacionados às rochas ou litologias presentes);
- **bioestratigráficas** (delimitações de pacotes de rochas pelo seu conteúdo fóssilífero);
- **cronoestratigráficas** (delimitadas por intervalos de tempo).

A unidade litoestratigráfica mais importante e fundamental é a **FORMAÇÃO**. Uma formação é um pacote constituído por uma ou mais litologias, mas que em seu conjunto representa um corpo homogêneo, distinto das unidades adjacentes, e deve ter uma extensão tal que permita seu mapeamento em uma escala de 1:25.000. Conjuntos de formações relacionadas constituem subgrupos e grupos, e cada formação pode apresentar subdivisões.

FORMAÇÃO

Conjunto relativamente homogêneo de rochas mapeável na superfície terrestre ou em subsuperfície na escala 1:25.000.

TEMPO GEOLÓGICO

O desenvolvimento da estratigrafia permitiu correlacionar estratos presentes em diferentes continentes. A determinação da idade absoluta das rochas, por métodos radiométricos permitiu a construção de uma tabela do tempo geológico, desde a formação da Terra há 4,6 bilhões de anos atrás.

Nas aulas 3 e 4 você viu as principais subdivisões dessa tabela, os éons. É importante recordá-las! O éon Fanerozóico está subdividido em três grandes Eras: Era Paleozóica (vida antiga), Era Mesozóica (vida intermediária) e Era Cenozóica (vida moderna). As eras, por sua vez, estão subdivididas em períodos, os quais estão subdivididos em épocas (Tabela 15.2). Estas subdivisões estão fortemente marcadas pela evolução dos seres vivos, como você verá nas aulas 17 e 18.

Tabela 15.2: As principais subdivisões do tempo geológico. O tempo decorrido desde o início de cada era ou período é expresso em anos (a), usando as seguintes abreviações: Ma = milhões de anos, Ba = bilhões de anos.

| Éons | Eras | Períodos | Épocas | Tempo decorrido |
|---------------------|-------------------|--------------------|-------------|-----------------|
| Fanerozóico | Cenozóica | Quaternário | Holoceno | 11.000 a |
| | | | Pleistoceno | 1,6 Ma |
| | | Terciário | Plioceno | 5 Ma |
| | | | Mioceno | 23 Ma |
| | | | Oligoceno | 35 Ma |
| | | | Eoceno | 56 Ma |
| | | | Paleoceno | 65 Ma |
| | Mesozóica | Cretáceo | | 144 Ma |
| | | Jurássico | | 206 Ma |
| | | Triássico | | 248 Ma |
| | Paleozóica | Permiano | | 290 Ma |
| | | Carbonífero | | 362 Ma |
| | | Devoniano | | 408 Ma |
| | | Siluriano | | 439 Ma |
| | | Ordoviciano | | 510 Ma |
| | | Cambriano | | 570 Ma |
| Proterozóico | | | | 2,5 Ba |
| Arqueano | | | | 3,8 Ba |
| Hadeano | | | | 4,6 Ba |

RESUMO

Princípio do Uniformitarismo – usado por todos os geólogos, este princípio estabelece que os processos que ocorrem hoje são os mesmos que ocorriam no passado.

Estratigrafia – é a ciência que estuda as seqüências de estratos, estabelecendo relações entre os mesmos e permitindo sua organização em uma seqüência cronológica de eventos. Baseada em 3 princípios fundamentais: horizontalidade original, superposição das camadas e sucessão faunal.

Princípio da horizontalidade original – estabelece que os sedimentos são depositados horizontalmente em meio aquoso.

Princípio da Superposição das Camadas – em uma seqüência não perturbada de estratos, cada estrato é mais novo que o estrato imediatamente abaixo dele.

Princípio da Sucessão Faunal – as populações de organismos evoluem no tempo e as formas anteriores não voltam a aparecer.

Datação relativa – é o estabelecimento da ordem em que dois eventos aconteceram, sem determinação do tempo decorrido desde o início de cada um deles.

Datação absoluta de uma rocha – determinação da idade da rocha em anos.

Formação – unidade litoestratigráfica fundamental, é um pacote constituído por uma ou mais rochas relacionadas entre si e que formam um corpo homogêneo, distinto das unidades adjacentes.

Tempo geológico – dividido inicialmente em éons, desde a formação da Terra há 4,6 Ba. O Éon Fanerozóico iniciado há 570 Ma está subdividido em 3 grandes Eras: Era Paleozóica, entre 570 e 248 Ma, Era Mesozóica, entre 248 e 65 Ma e Era Cenozóica, desde 65 Ma até hoje. As subdivisões das eras são chamadas de períodos, e os períodos estão subdivididos em épocas.

EXERCÍCIOS

1. O que é decaimento radioativo?
2. Qual é a idade limite para materiais que podem ser datados usando carbono-14?
3. Construa uma tabela com as Eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica, e as datas em que cada uma teve início.

4. Construa um diagrama mostrando a seguinte seqüência de eventos:

- a. Sedimentação de uma formação sedimentar, constituída pela rocha A.
- b. Sedimentação de outra formação sedimentar, constituída pela rocha B.
- c. Derrame basáltico.
- d. Sedimentação de outra formação sedimentar, constituída pela rocha C.

Sabendo que a datação absoluta determinou uma idade de 150 Ma para o evento vulcânico de formação do basalto, o que você poderia afirmar sobre a idade dos fósseis presentes na camada C? E sobre os da camada B?

5. Considerando a resposta do exercício anterior, discuta se a datação absoluta de uma rocha ígnea pode ser útil para datar fósseis.

**Tempo geológico e
os fósseis como um
registro dos processos
evolutivos ao longo
das Eras Geológicas.
Bacias Sedimentares.**

AULAS 17 / 18

objetivos

- Identificar os limites temporais das Eras Geológicas e as principais características dos seres vivos em cada uma delas.
- Reconhecer as potencialidades e limitações do registro paleontológico.
- Entender o conceito de bacia sedimentar.

Pré-requisitos

Aulas 7 a 16

BACIAS SEDIMENTARES

Extensas depressões no relevo onde ocorre a deposição de sedimentos removidos pela erosão de áreas mais altas; a continuação do processo ao longo do tempo geológico resulta na formação de espessos pacotes sedimentares, que podem atingir alguns milhares de metros de espessura.

As aulas 17 e 18 encerram o **Módulo 4** da nossa disciplina. São aplicações dos conhecimentos adquiridos anteriormente a uma visão geral da importância do registro fóssil ao longo das eras geológicas, e do significado desse registro: a história da evolução dos seres vivos. Este registro é encontrado nas **BACIAS SEDIMENTARES**, já que as rochas mais adequadas à preservação de fósseis são as rochas sedimentares. Os princípios fundamentais da estratigrafia são aplicados ao estudo das bacias sedimentares, permitindo a dedução de relações temporais entre os registros fósseis de diversas espécies, extintas ou não. Como ilustração, examinaremos a história de uma bacia sedimentar paleozóica brasileira, a Bacia do Paraná.

TEMPO GEOLÓGICO

A ação do intemperismo sobre as rochas na superfície terrestre, bem como os processos de erosão, transporte e deposição sedimentar, ocorrem desde os tempos mais remotos, desde que se formou a crosta terrestre. O registro geológico, entretanto, é descontínuo. Eventos erosivos ou tectônicos resultaram na perda de muitas informações. Essa razão contribui para que existam muitas diferenças nas seqüências estudadas nos diferentes continentes, assim como as divisões cronológicas da história da Terra que apresentam algumas variações para diferentes países. Em linhas gerais, entretanto, existe uma boa correspondência, e o tempo decorrido desde a formação do planeta está dividido em Éons, os quais se subdividem em Eras, e estas em Períodos (veja novamente a tabela do tempo geológico, **Tabela 17.1**).

Tabela 17.1: As principais subdivisões do tempo geológico. O tempo decorrido desde o início de cada era ou período é expresso em anos (a), usando as seguintes abreviações: Ma = milhões de anos, Ba = bilhões de anos.

| Éons | Eras | Períodos | Épocas | Tempo decorrido |
|---------------------|-------------------|--------------------|-------------|-----------------|
| Fanerozóico | Cenozóica | Quaternário | Holoceno | 11.000 a |
| | | | Pleistoceno | 1,6 Ma |
| | | Terciário | Plioceno | 5 M |
| | | | Mioceno | 23 Ma |
| | | | Oligoceno | 35 Ma |
| | | | Eoceno | 56 Ma |
| | | | Paleoceno | 65 Ma |
| | Mesozóica | Cretáceo | | 144 Ma |
| | | Jurássico | | 206 Ma |
| | | Triássico | | 248 Ma |
| | Paleozóica | Permiano | | 290 Ma |
| | | Carbonífero | | 362 Ma |
| | | Devoniano | | 408 Ma |
| | | Siluriano | | 439 Ma |
| | | Ordoviciano | | 510 Ma |
| | | Cambriano | | 570 Ma |
| Proterozóico | | | | 2,5 Ba |
| Arqueano | | | | 3,8 Ba |
| Hadeano | | | | 4,6 Ba |

Devido ao enorme espaço de tempo decorrido, os sedimentos depositados durante os Éons Arqueano e Proterozóico em geral já passaram por vários ciclos de tectonismo e metamorfismo, ficando o registro paleontológico correspondente muito danificado, e perdidas definitivamente importantes informações. Entretanto, algumas áreas da crosta terrestre apresentam grande estabilidade tectônica desde estes tempos remotos, tendo sofrido apenas, algumas vezes, os estágios iniciais de metamorfismo. Tais rochas guardam ainda registros da vida primitiva que se desenvolveu desde o Éon Arqueano.

A transição do Éon Proterozóico para o Éon Fanerozóico (vida visível) é marcada por uma grande explosão de formas novas de vida (relembrando das aulas 3 e 4: proterozóico e fanerozóico significam “vida primitiva” e “vida visível”, respectivamente). As rochas do Éon Fanerozóico são relativamente mais jovens (570 milhões de anos ou menos), e esse Éon se encontra subdividido mais detalhadamente, em decorrência da melhor conservação de seu registro paleontológico.

PALEOZÓICO

Vida antiga

MESOZÓICO

Vida intermediária

CENOZÓICO

Vida moderna

O Éon Fanerozóico encontra-se dividido em Eras: **PALEOZÓICA**, **MESOZÓICA** e **CENOZÓICA**, e as eras estão subdivididas em períodos. Você não precisa decorar os intervalos de tempo decorridos entre cada período geológico, mas é preciso saber o tempo decorrido entre os limites que marcam as principais etapas evolutivas: Éons e Eras, para poder acompanhar a discussão que se segue. Retorne sempre à tabela para identificar ainda a seqüência dos períodos de cada era. Esta noção será de grande utilidade no estudo da evolução (abordada em detalhe em outras disciplinas).

A VIDA PRIMITIVA

Já sabemos que os restos fósseis estão preservados em abundância em rochas a partir da Era Paleozóica (com pouco mais de meio bilhão de anos). Resta, portanto, um período de cerca de 4 bilhões de anos, ao longo do qual a vida teve início na Terra, não se sabe exatamente quando.

Algumas evidências geológicas sugerem para nós como era o ambiente na superfície da Terra quando a vida teve início. Os elementos químicos que constituem a maior parte dos organismos vivos (carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo e magnésio ver novamente as aulas 1 e 2) encontram-se entre os 20 mais abundantes do sistema solar. Muitos destes elementos ocorrem na forma de gases, puros (nitrogênio, oxigênio) ou formando compostos (tais como vapor d’água (H₂O), metano (CH₄) e amônia (NH₃)). Informações obtidas através do estudo de outros planetas indicam atmosferas compostas por hidrogênio, hélio e metano ou amônio. Essas informações sugerem que a atmosfera primitiva da Terra era composta por hidrogênio, hélio, metano, amônia, gás carbônico, monóxido de carbono e água. Mais tarde, oxigênio e nitrogênio teriam sido liberados a partir desta mistura gasosa.

A famosa experiência realizada por **MILLER**, em 1954, demonstrou que a ocorrência de descargas elétricas em um ambiente deste tipo seria responsável pela formação de aminoácidos, levando à suposição de que os oceanos primitivos eram constituídos por uma “sopa orgânica”. Esta “sopa” teria dado origem aos organismos mais primitivos ao mesmo tempo em que servia de alimento para os mesmos, há cerca de 3,5 bilhões de anos atrás. Mais tarde, há pelo menos 2 bilhões de anos atrás, estes organismos teriam desenvolvido a capacidade de sintetizar moléculas mais complexas a partir de compostos simples, surgindo então organismos capazes de sintetizar seus alimentos a partir de CO_2 , água e energia solar: os organismos fotossintetizantes. A fotossíntese gerou um subproduto que foi aos poucos modificando a composição da atmosfera – o oxigênio.

Infelizmente, as probabilidades de descobrirmos evidências paleontológicas da vida quando esta teve início são praticamente nulas. Os diversos ciclos de deformação, intemperismo e erosão que ocorreram antes do Éon Fanerozóico destruíram a maior parte dos delicados registros. Entretanto, uma pergunta continua sem resposta: por que a partir do Período Cambriano (570 milhões de anos atrás, no início da Era Paleozóica) surgiram tantos fósseis de animais já bastante evoluídos, enquanto que nos tempos **PRÉ-CAMBRIANOS** só encontramos fracas evidências de formas primitivas de vida?

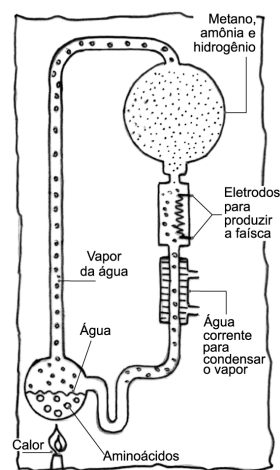
Do ponto de vista paleontológico os registros da vida pré-cambriana são representados por raros fósseis e moldes de organismos primitivos preservados em antigos sedimentos e produtos químicos gerados pela atividade de organismos.

Entre as secreções produzidas por organismos Pré-Cambrianos destacam-se os estromatólitos (**Figura 17.1**), que são estruturas ramificadas ou laminadas compostas originalmente por carbonato de cálcio. Tais estruturas são comuns em rochas com até 2 bilhões de anos e podem formar bancos com até algumas dezenas de metros de espessura. Podemos observar estruturas semelhantes sendo formadas hoje em dia por algas cianofícias em regiões marinhas tropicais (**Figura 17.2**). Além disso, até hoje, não é conhecido nenhum processo inorgânico que seja capaz de formar tais estruturas. Sendo assim, podemos aplicar o princípio do uniformitarismo (“o presente é a chave do passado”) e chegar a duas importantes conclusões:

S. L. MILLER

Pesquisador da Universidade de Chicago, realizou em 1954 uma experiência que ficou famosa: construiu um aparelho onde circulavam e se misturavam o vapor d'água, amônia, metano e hidrogênio.

A mistura foi submetida a descargas elétricas durante uma semana, simulando os relâmpagos na atmosfera primitiva, e ao final desse período a solução existente no balão passou a conter aminoácidos, que são compostos básicos formadores das proteínas presentes nos organismos. (Fonte: McAlester, A.L. 1971 História Geológica da Vida, Editora Edgard blucher Ltda, cap. 1, pág. 25, fig. 1.1).



PRÉ-CAMBRIANO

Corresponde ao tempo geológico que antecedeu o Período Cambriano (o primeiro da Era Paleozóica). Compreende os Éons Hadeano, Arqueano e Proterozóico).

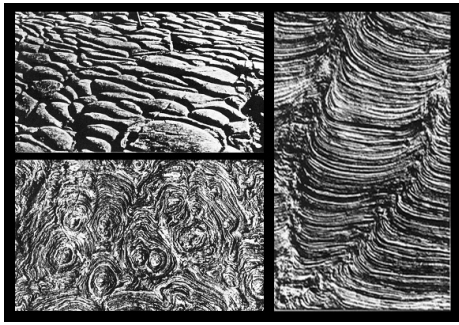


Figura 17.1: Estromatólitos pré-cambrianos, constituídos por lâminas concêntricas de carbonato de cálcio, com forma semi-esférica. Acima, à esquerda, as estruturas vistas de cima. Embaixo, à esquerda, um corte horizontal e à direita um corte vertical. Estas estruturas foram provavelmente formadas por cianofíceas, e possuem idade de cerca de 2 bilhões de anos. Great Slave Lake, Canadá. Fonte: McAlester, A.L., 1971, História Geológica da Vida. Tradução de Sérgio Estanislau do Amaral. Série de textos básicos de geociência, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, p. 31.

- Os estromatólitos são secreções produzidas por organismos há pelo menos dois bilhões de anos.
- Organismos muito primitivos já existentes no Pré-Cambriano não foram necessariamente extintos ao longo do processo evolutivo – alguns continuam existindo até o presente.

No Brasil são conhecidas algumas ocorrências de estromatólitos em rochas calcárias fracamente metamorizadas de idade Pré-Cambriana em Itapeva (SP), Corumbá (MT) e Curitiba (PR).

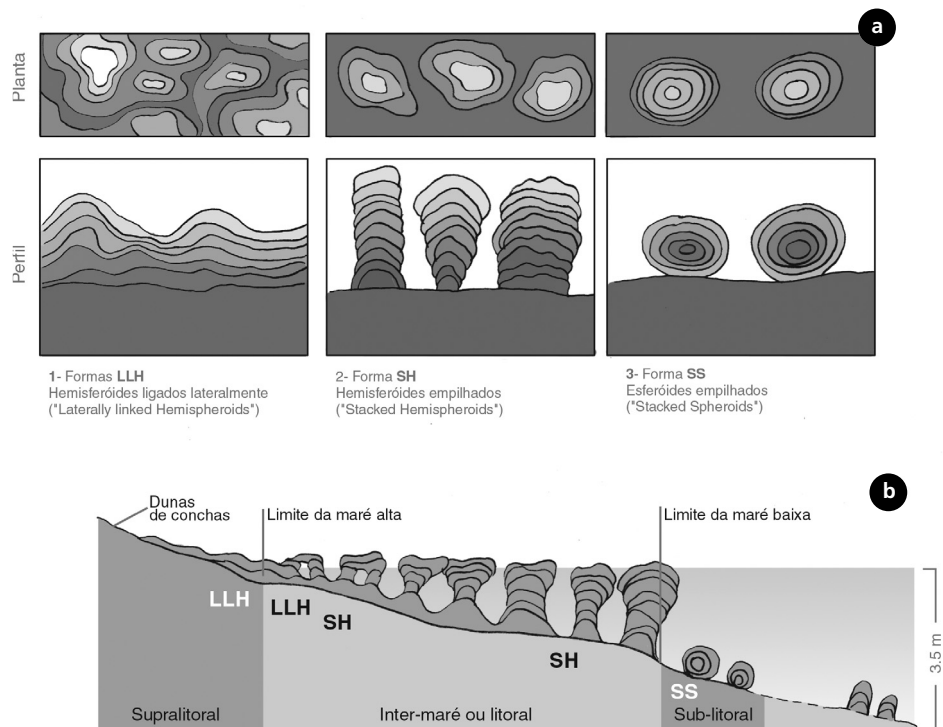


Figura 17.2: Classificação dos estromatólitos holocênicos (a) e sua distribuição na baía de Tubarão, Austrália (b). Fonte: Srivastava, N.K. , 2000, Estromatólitos. In: Carvalho, I.S., 2000, Paleontologia, Cap. 8, p. 127. Rio de Janeiro, Editora Interciência.

Quanto aos restos de organismos de idade Pré-Cambriana, as ocorrências são muito mais raras. Uma ocorrência bastante conhecida é a “Flora do Silex Gunflint” presente no Norte dos EUA e nos arredores de Ontário, no Canadá. No meio de uma espessa seqüência sedimentar Pré-Cambriana ocorre uma camada de **SILEX** com cerca de 3 metros de espessura. Sua forma sugere tratar-se de um antigo estromatólito em que o carbonato de cálcio foi substituído por sílex. Ao dissolver-se o sílex em ácido fluorídrico pode-se observar resíduos formados por filamentos e esférulas típicas de plantas primitivas (**Figura 17.3**). A semelhança entre os filamentos observados e as modernas cianofíceas é de grande importância, pois sugere que estes organismos, com cerca de 2 bilhões de anos de idade, eram capazes de realizar a fotossíntese. Outras ocorrências de restos preservados de bactérias e cianofíceas, com até 3 bilhões de anos de idade, na África do Sul, indicam que estes seres eram comuns nos primórdios da Era Proterozóica.

A única ocorrência de fósseis de animais conhecida do Pré-Cambriano foi descoberta no Sul da Austrália, e ficou conhecida como “Fauna de Ediacara” (**Figura 17.4**). Os registros são constituídos por moldes sobre a superfície de **ARENITOS**. Uma vez que estes seres eram constituídos apenas por partes moles, seus tecidos não foram preservados, e as impressões deixadas parecem incluir dois **FILOS**: o dos Celerados (organismos multicelulares que incluem os corais, as anêmonas e as medusas) e o dos Anelídeos (vermes segmentados de organização evoluída como a minhoca).

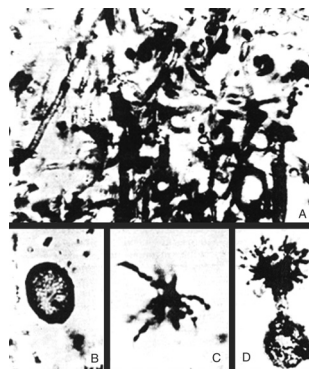


Figura 17.3: Fragmentos de plantas pré-cambrianas, de 2 bilhões de anos de idade, do Silex Gunflint, Ontário, Canadá, aumentadas de 1000 a 2000 vezes. (A) formas filamentosas semelhantes a bactérias e a cianofíceas; (B) formas esféricas semelhantes a bactérias; (C) formas estreladas e (D) formas de para-quedas, desconhecidas.

Fonte: McAlester, A.L., 1971, História Geológica da Vida. Tradução de Sérgio Estanislau do Amaral. Série de textos básicos de geociência, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, p. 33.

SILEX

(SiO₂, mesma composição química do quartzo, mas com menor grau de cristalização).

ARENITOS

Rochas sedimentares formadas pela acumulação e consolidação de partículas da fração granulométrica areia.

FILO

Subdivisão dos Reinos existentes na classificação dos seres vivos

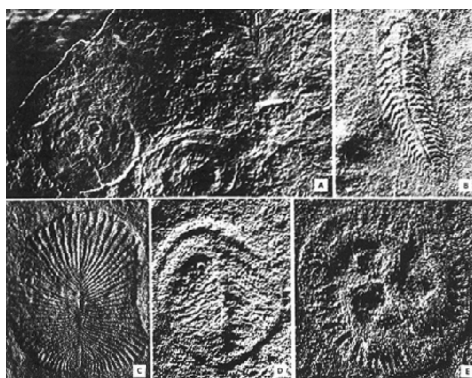


Figura 17.4: Os fósseis de animais mais antigos que se conhece datam do pré-cambriano superior e são conservados como impressões em arenito da Formação Ediacara, Austrália. (A) formas arredondadas semelhantes à medusas, com cerca de 10 cm. (B) Ser alongado e vermiforme, com cerca de 3cm de comprimento. (C) Ser vermiforme arredondado, medindo 5cm no eixo maior. (D) Forma desconhecida, ovalada, com cerca de 2cm segundo o eixo maior. (E) Forma circular com hastes encurvadas, também desconhecida no presente, com 2cm de diâmetro. Fonte: McAlester, A.L., 1971, História Geológica da Vida. Tradução de Sérgio Estanislau do Amaral. Série de textos básicos de geociência, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, p. 35.

A ATMOSFERA PRIMITIVA

Os registros da vida primitiva são escassos. Um contraste marcante se dá após o início da Era Paleozóica, no Período Cambriano. Os fósseis de animais se tornam abundantes, e constituem um registro de formas complexas multicelulares. Como explicar esta explosão de diversidade? Várias hipóteses têm sido levantadas:

- no Pré-Cambriano os animais não possuíam partes duras – seria uma boa hipótese, a qual, no entanto, não explica o fato de sedimentos Pré-Cambrianos pouco metamorfizados não apresentarem vestígios destes organismos, tais como pistas, pegadas e moldes (a Fauna de Ediacara constitui uma exceção);
- os animais primitivos teriam se desenvolvido em ambientes que não estão bem representados no registro litológico – essa hipótese é melhor que a primeira, embora um grande número de ambientes esteja representado nas rochas Pré-Cambrianas;
- a atmosfera primitiva, pobre em oxigênio, seria desfavorável à existência de animais, os quais requerem o oxigênio livre para sua respiração, seja dissolvido na água ou na atmosfera – este provavelmente constituiu um fator decisivo; entretanto, como explicar a rápida evolução de diferentes filos animais em um espaço de tempo tão curto do ponto de vista geológico?



Existem muitas evidências geológicas de que a atmosfera primitiva era redutora. Entre elas, está o fato de os depósitos de minério de ferro do Pré-Cambriano tenderem a se apresentar associados a estromatólitos. Esta observação sugere que o oxigênio produzido pela atividade fotossintética das cianofíceas se combinaria com o ferro dissolvido nas águas adjacentes formando óxidos de ferro pouco solúveis, os quais se depositariam junto aos demais sedimentos. Após a oxidação e remoção do ferro e outros elementos dissolvidos teria início a acumulação do oxigênio livre nos oceanos e na atmosfera.

Alguns paleontólogos sugerem que os primeiros animais teriam evoluído lentamente em **MICRO AMBIENTES** oxidantes existentes ao redor de aglomerações de algas cianofíceas. Sendo assim, a restrita distribuição destes ambientes levaria a uma maior dificuldade de preservação do registro paleontológico, e somente há cerca de 600 milhões de anos, quando o oxigênio atmosférico atingiu 6% dos valores atuais, estes organismos puderam sair de seus micro ambientes, ocorrendo então sua dispersão e diversificação.

Ainda assim, parece espantoso que em um período de cerca de 10 milhões de anos (um tempo muito curto do ponto de vista geológico! Veja as aulas 3 e 4!) tenha ocorrido uma explosão equivalente a um “Big Bang biológico”. Os fósseis de seres multicelulares em rochas mais antigas são muito raros, enquanto que são bastante abundantes em rochas mais jovens. Se a evolução da atmosfera ocorreu de forma gradual, não seria esperado que a evolução dos seres vivos se desse da mesma forma? Não seria necessário um longo tempo para a atuação da seleção natural sobre as variações genéticas naturais?

A VIDA NO MAR

A maior parte dos filos de organismos teve sua origem no mar. Quase todos possuem ainda hoje representantes que são encontrados no mar, e muitos filos ocorrem exclusivamente naquele ambiente. **É provável que todos os seres pré-cambrianos tenham vivido no mar, bem como a maior parte dos organismos que viveram nos Períodos Cambriano e Ordoviciano, os primeiros da Era Paleozóica.**

Os organismos que possuem partes duras (conchas, esqueletos e carapaças) são facilmente encontrados na forma de fósseis, enquanto que aqueles que só possuem partes moles são preservados apenas em condições especiais.

Além da presença de partes duras, é fundamental que o ambiente não favoreça a rápida decomposição, a qual muitas vezes se dá pela ação de organismos **NECRÓFAGOS** ou por bactérias. Você certamente se lembra das aulas 13 e 14, onde vimos que altas taxas de sedimentação favorecem o processo de preservação. Seguindo o mesmo raciocínio, podemos concluir que os **ORGANISMOS BENTÔNICOS** têm maior probabilidade de serem preservados do que os **PLANCTÔNICOS**.

MICRO-AMBIENTES

Ambientes com distribuição geográfica restrita.

NECRÓFAGOS

Organismos que se alimentam de restos de seres em decomposição.

ORGANISMOS BENTÔNICOS

Vivem sobre ou dentro dos sedimentos em ecossistemas aquáticos.

ORGANISMOS PLANCTÔNICOS

Flutuam nas águas de diferentes ecossistemas aquáticos, movimentando-se pela ação de correntes.

Os Períodos Cambriano e Ordoviciano são muitas vezes agrupados sob a denominação geral de “Paleozóico Inferior” e correspondem a um tempo em que a vida se desenvolveu no mar. As bactérias e algas cianofíceas existentes desde o Pré-Cambriano continuam presentes, tendo surgido, no fim do Ordoviciano, registro de secreções de algas verdes e vermelhas. É de grande importância observar que todos estes são filos de algas bentônicas, não havendo registros de algas planctônicas, as quais, atualmente, constituem as bases da vida no mar, servindo de alimento a todos os demais seres, direta ou indiretamente. Considerando a grande abundância e diversidade de invertebrados já existentes no Paleozóico inferior (quase todos os filos de invertebrados existentes hoje), só podemos supor que estes se alimentavam de **FITOPLANCTON** não fossilizável (sem partes duras).

FITOPLÂNCTON

Algas microscópicas flutuantes que constituem o alimento do zooplâncton, constituído por pequenos animais aquáticos.

Os invertebrados dominantes no Paleozóico inferior eram trilobitas e braquiópodes (**Figura 17.5**). No Ordoviciano, entretanto, surgiu a maioria dos filos de invertebrados conchíferos modernos. Esta expansão pode ser atribuída ao aparecimento de predadores no fim do Cambriano, quando então as conchas passam a ter uma função protetora além da função inicial de sustentação. Esta hipótese é reforçada pela diminuição quantidade de artrópodes sem carapaças, anelídeos e outros vermiformes, juntamente com a expansão ordoviciano dos conchíferos.

A TRANSIÇÃO PARA O CONTINENTE

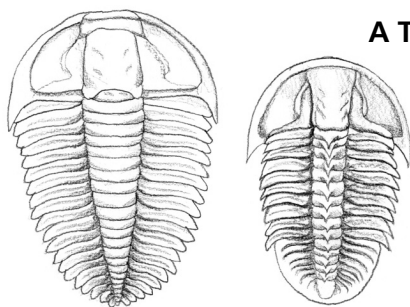


Figura 17.5: (A) *Bathyriscus formosus* Deiss, com 6 cm de comprimento, trilobita do cambriano da América do Norte. (B) *Hypermecaspis armata* Harrington e Leanza, trilobita com cerca de 2cm de comprimento, Ordoviciano da Argentina. Fonte: Mendes, J.C. 1977 Paleontologia Geral. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p. 195.

A transição das plantas para o continente é pouco documentada no registro fóssil, pois provavelmente as formas de transição não possuíam estruturas calcificadas, como alguns de seus parentes antigos, nem fortes tecidos de celulose, como seus descendentes. Além disso, o ambiente terrestre favorece mais os processos de erosão do que os de acumulação. As algas verdes parecem ser os ancestrais mais prováveis das plantas terrestres, pela afinidade no processo de fotossíntese, e pelo êxito que tiveram na transição da água salgada para a doce. Para sobreviver no ambiente terrestre, foi preciso desenvolver um sistema radicular para retirar água e nutrientes do solo, folhas para a fotossíntese e um sistema vascular para transporte da água e dos nutrientes da raiz para as folhas.

Durante a Era Paleozóica os continentes eram dominados por plantas sem flores nem sementes, as **CRIPTOGAMAS**, que viviam confinadas aos ambientes úmidos (Figura 17.6). Durante o Período Carbonífero essas plantas foram sendo substituídas pelas **GIMNOSPERMAS**, que possuem sementes e pólen, e, portanto, podem se reproduzir mais facilmente no ambiente seco (Figura 17.7). As gimnospermas foram as principais plantas de grande porte durante a Era Mesozóica, e ainda hoje formam extensas florestas de pinheiros. Ainda durante a Era Mesozóica surgiram as **ANGIOSPERMAS**, plantas com flores, cuja estratégia de reprodução teve como consequência o domínio da paisagem terrestre a partir do final a Era Mesozóica e até os dias de hoje (Figura 17.8).

Os mais antigos fósseis de animais terrestres datam do Siluriano. São aracnídeos, semelhantes a escorpiões. Tais organismos enfrentaram incontáveis problemas adaptativos nesta radical transição: suprimentos de água mais restritos; perda d'água por evaporação; estruturas respiratórias e reprodutivas especiais; equilíbrio osmótico diferenciado para os organismos de água doce. As vantagens, entretanto, também eram muitas: grandes espaços para as plantas, com luz solar abundante; oxigênio livre na atmosfera para os animais, e alimentação garantida com a proliferação das plantas.

Muitos filos de invertebrados adaptaram-se, inicialmente, à vida em rios e lagos. Os gastrópodes e os artrópodes adaptaram-se à vida terrestre por sua maior mobilidade, facilitando a procura de alimentos e por possuírem estruturas de proteção ao ressecamento (conchas calcárias e carapaças quitinosas).

CRIPTOGAMAS

Plantas terrestres sem flores nem sementes.

GIMNOSPERMAS

Plantas terrestres sem flores, mas que possuem sementes e pólen.

ANGIOSPERMAS

Plantas terrestres com flores.

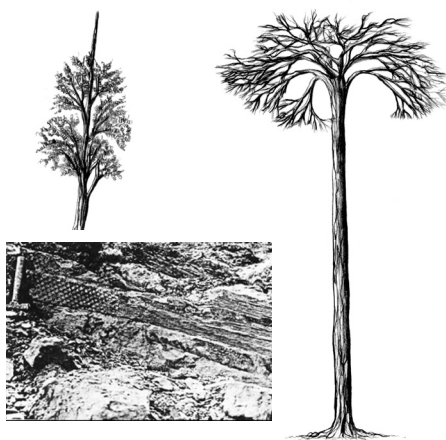


Figura 17.6: Criptógamas, plantas sem sementes, agrupam desde plantas vasculares destituídas de folhas e raízes até árvores lenhosas, como o *Lepidodendron* (reconstituição à direita), comum no carbonífero do Hemisfério Norte, e que podia alcançar até 8 metros de altura. À esquerda, folhas de uma criptógama moderna, o *Lycopodium*. Abaixo, tronco de uma criptógama do carbonífero, fossilizada por impressão. Fonte: McAlester, A.L., 1971, *História Geológica da Vida*. Tradução de Sérgio Estanislau do Amaral. Série de textos básicos de geociência, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, p. 108.

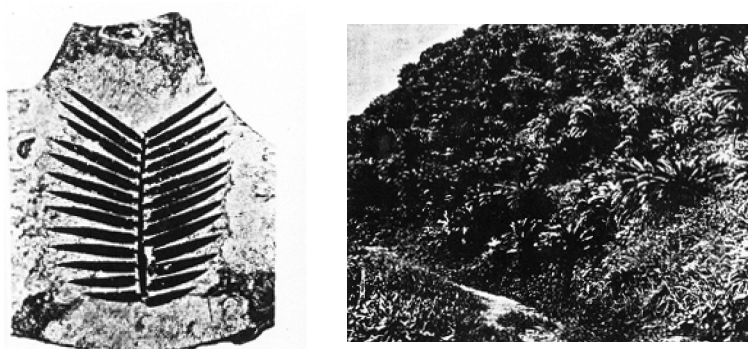


Figura 17.7: Impressão foliar de uma gimnosperma do mesozóico, classe das cidáceas, à esquerda. À direita, foto de cidáceas atuais. Fonte: McAlester, A.L., 1971, História Geológica da Vida. Tradução de Sérgio Estanislau do Amaral. Série de textos básicos de geociência, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, p. 115.

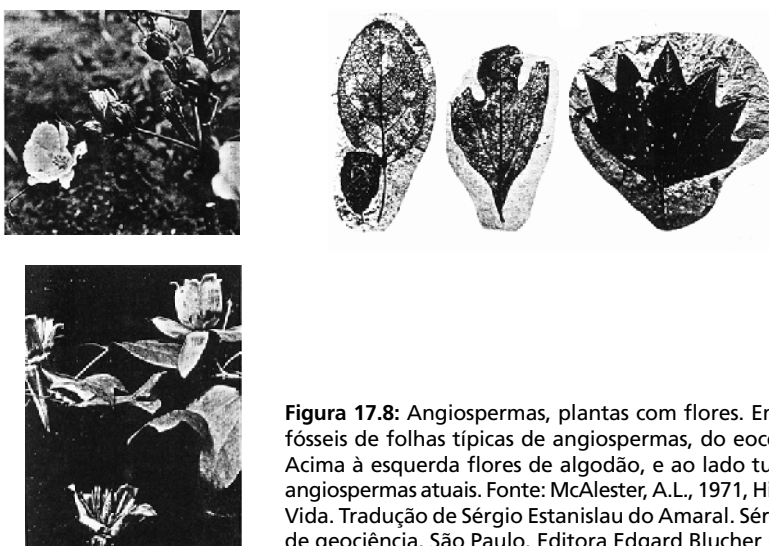


Figura 17.8: Angiospermas, plantas com flores. Em cima, impressões fósseis de folhas típicas de angiospermas, do eoceno e do mioceno. Acima à esquerda flores de algodão, e ao lado tulipas, exemplos de angiospermas atuais. Fonte: McAlester, A.L., 1971, História Geológica da Vida. Tradução de Sérgio Estanislau do Amaral. Série de textos básicos de geociência, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, p. 118.

A preservação de fósseis em ambiente terrestre é ainda mais difícil que no ambiente marinho, uma vez que os sedimentos continentais estão mais expostos aos processos de intemperismo e erosão do que os sedimentos marinhos, mais protegidos. Sendo assim, o registro fóssil dos invertebrados terrestres é muito falho, não sendo conhecidos os tipos ancestrais de transição, originados do ambiente aquoso.

No caso dos vertebrados, ao contrário, a transição para terra firme se acha claramente registrada. A origem dos vertebrados a partir de invertebrados, contudo, também não está documentada no registro fossilífero.

Os primeiros vertebrados foram os peixes primitivos. Os primeiros restos fósseis são do Período Ordoviciano, representados inicialmente pelo **AGNATAS** (peixes sem mandíbula, Figura 17.9), surgindo no Siluriano os

AGNATAS

Peixes sem mandíbula

PLACODERMAS (Figura 17.10), que logo foram substituídos pelos tubarões e peixes ósseos (Figura 17.11), no Devoniano. O Período Devoniano marca a evolução dos peixes e também sua transição para terra firme. Uma modificação da bexiga natatória permitiu seu funcionamento de modo semelhante a um pulmão, e nadadeiras lobadas permitiram a locomoção em terra firme. O problema da reprodução fora da água, entretanto, só foi resolvido pelos répteis, descendentes dos anfíbios (Figura 17.12).

PLACODERMAS
Peixes primitivos
dotados de mandíbula

Os répteis surgiram no final da Era Paleozóica e foram os vertebrados terrestres predominantes durante o Permiano e grande parte do Triássico. Os anfíbios dependem da água para seus processos reprodutivos. Os répteis não, pois se reproduzem através de ovos dotados de casca e providos em seu interior de membrana amniótica. No final do Triássico, os dinossauros (Figura 17.13) se tornam o grupo de répteis dominante, até o final da Era Mesozóica. Outros grupos de répteis primitivos deram origem aos mamíferos e às aves. Durante o tempo em que os dinossauros eram dominantes, entretanto, os mamíferos primitivos eram pequenos e raros.

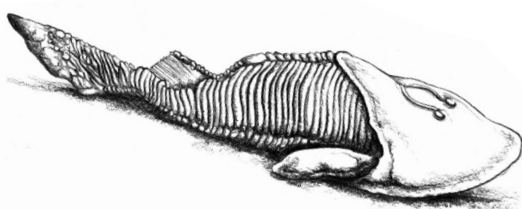


Figura 17.9: Cephalaspis, peixe agnato do grupo dos cefalaspídeos, com cerca de 16 cm. Observe a cabeça, protegida por um escudo ósseo achatado e o corpo recoberto por placas ósseas alongadas. Fonte: Mendes, J.C. 1977 Paleontologia Geral. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p. 233.

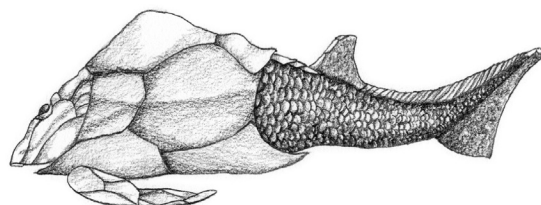


Figura 17.10: Pterischthys milleri Agassiz, peixe placodermo abundante nas águas doces do devoniano, com cerca de 15cm de comprimento. A porção anterior era revestida por uma couraça, e a posterior era nua ou revestida de escamas. Fonte: Mendes, J.C. 1977 Paleontologia Geral. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p. 236.

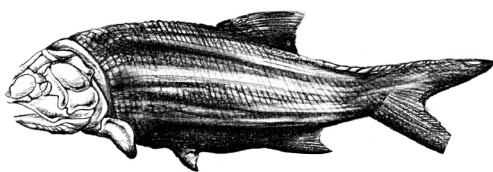


Figura 17.11: Tholonotus braziliensis Dunkle e Schaeffer, pequena forma da classe dos Osteíctes, com cerca de 12 cm. Ocorrência do paleozóico no sul do Brasil, Bacia do Paraná. Apresentam esqueleto interno. Fonte: Mendes, J.C. 1977 Paleontologia Geral. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p. 239.



Figura 17.12: Reconstituição do esqueleto de um anfíbio "labirintodonte", anfíbios mesozóicos adaptados a diversos nichos ecológicos. Fonte: Dias, E.V., 2000, Anfíbios, In: Carvalho, I.S., 2000, Paleontologia, Cap. 29, p. 526. Rio de Janeiro, Editora Interciência.

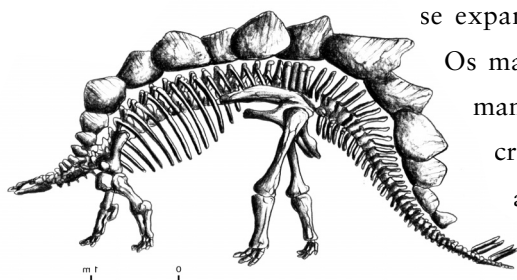


Figura 17.13: Reconstituição do esqueleto de um Stegosaurus, dinossauro jurássico apresentando placas ósseas dorsais. Fonte: Bertini, R.J., 2000, Anfíbios, In: Carvalho, I.S., 2000, Paleontologia, Cap. 30, p. 563. Rio de Janeiro, Editora Interciência.



PROSSÍMIOS

Um exemplo atual de um prossímio, os Lemuróides habitam hoje a Ásia tropical, África e especialmente a ilha Madagascar

No final da Era Mesozóica ocorreu uma extinção em massa dos répteis, e durante a Era Cenozóica, dois grupos de mamíferos se expandiram rapidamente: os placentários e os marsupiais.

Os mamíferos são caracterizados pela presença de glândulas mamárias, que produzem o leite destinado à alimentação das crias, e por serem capazes de regular a temperatura do corpo através do metabolismo, mantendo-a alta e constante.

Os primatas surgiram no início da Era Cenozóica, apresentando algumas importantes características, como

o dedo polegar em oposição aos demais dedos, permitindo agarrar objetos e a visão dupla de cada objeto, que permite a noção de profundidade. Nos outros animais os olhos vêm em ângulos diferentes, quase sem superposição de imagens. Essas características conferem aos primatas grande habilidade de locomoção sobre as árvores, que oferecem alimento e abrigo de predadores.

Esses primatas primitivos não se encontram totalmente extintos, mas estão restritos a ambientes isolados, como a ilha de Madagascar, e algumas florestas de Sumatra, Bornéu e Filipinas. A ilha de Madagascar se separou do continente africano no início da Era Cenozóica, e foram poucos os mamíferos predadores que lá se desenvolveram. Lá são encontrados **PROSSÍMIOS**, que não se diversificaram em formas mais evoluídas.

Dentre os primatas, os **PONGÍDEOS** primitivos parecem ser os ancestrais comuns ao homem e aos pongídeos modernos (chimpanzé, gorila e orangotango). Dentre os fósseis de pongídeos destaca-se o Ramapithecus, encontrado em rochas do Mioceno e do Plioceno da Índia e da África. O registro fóssil do Pleistoceno é mais abundante, e são conhecidos três estágios de desenvolvimento do homem: Australopithecus, Homo erectus e Homo sapiens. Veja na **Figura 17.14** a evolução do crânio do homem do Pleistoceno e sua cultura como fabricante de artefatos.

O homem fóssil da nossa própria espécie apareceu há cerca de 500.000 anos, e com sua origem alcançamos o limite entre as ciências naturais geológicas e biológicas, a antropologia e a história antiga.

PONGÍDEOS

Primatas antropóides viventes em Bornéu e Sumatra.

BACIAS SEDIMENTARES

Você agora vai poder acompanhar um exemplo do estudo do registro fóssil da evolução dos organismos em uma grande seqüência de rochas sedimentares brasileira: a Bacia do Paraná (**Figura 17.15**).

Bacias sedimentares são extensas depressões no relevo, as quais constituem um local onde os sedimentos, removidos pela erosão de áreas de relevo mais alto, se depositam naturalmente pela ação da gravidade. Ao longo do tempo geológico, esta transferência de massa (e conseqüentemente de peso) acaba acentuando a depressão do embasamento rochoso, em um processo chamado de subsidência. A continuação deste processo pode resultar em grandes pacotes de rochas sedimentares pouco deformados, ou em dobramentos dos pacotes sedimentares, com vulcanismo associado, e formação de cadeias montanhosas (acredita-se que esta seja a origem das Serras do Espinhaço, do Mar e da Mantiqueira). Esse mecanismo de formação de cadeias montanhosas é chamado pelos geólogos de geossinclinal. Existem muitos tipos de bacias sedimentares, e sua evolução pode envolver diferentes tipos de tectonismo.

Um exemplo bastante interessante de bacia interior simples, formada em região continental estável do ponto de vista tectônico, é a Bacia do Paraná. Esta bacia apresenta forma grosseiramente ovalada com cerca de 2.000 Km em sua maior extensão e espessura de até 5.000 m.

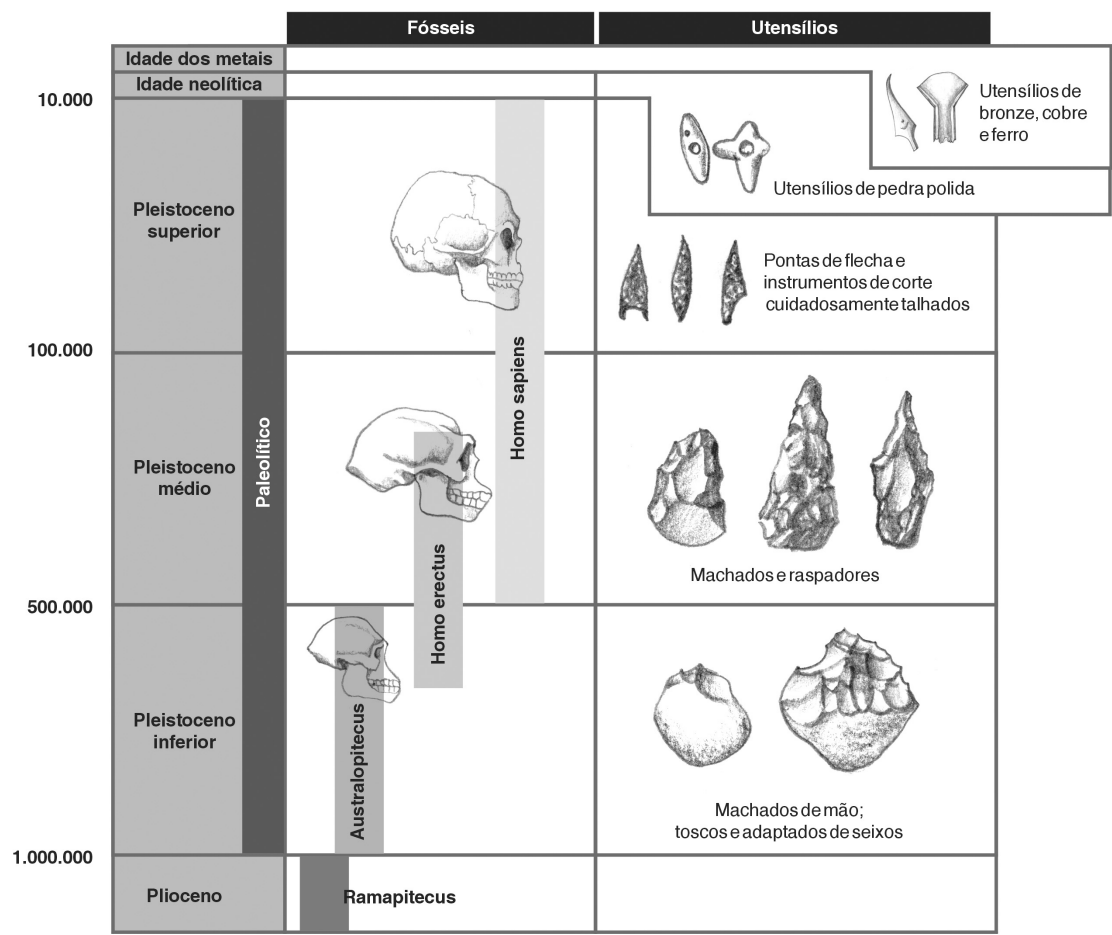


Figura 17.14: A evolução craniana do homem pleistocênico e da sua cultura como fabricante de artefatos. Fonte: McAlester, A.L., 1971, História Geológica da Vida. Tradução de Sérgio Estanislau do Amaral. Série de textos básicos de geociência, São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, p. 162.

A Bacia do Paraná começou a sua formação no final do Ordoviciano (Era Paleozóica). Naquele tempo, a Cordilheira dos Andes ainda não existia (só se desenvolveu durante a Era Mesozóica) e o mar invadia o continente Sul Americano, supostamente procedente da região onde hoje se situam os Andes. Desta forma foram depositados na Bacia do Paraná sedimentos marinhos contendo pelecípodos, gasterópodos e braquiópodos, entre outros fósseis. A sedimentação marinha continuou durante o Siluriano e o Devoniano (veja a **Tabela 17.2**, que apresenta a coluna estratigráfica simplificada da Bacia do Paraná).

Durante o Período Carbonífero depositaram-se sedimentos de origem glacial intercalados com sedimentos marinhos, testemunhando transgressões e regressões marinhas eventuais, intermediárias às glaciações. Estas seqüências podem atingir até 800 metros de espessura. Durante o Permiano depositaram-se sedimentos variados, desde sedimentos de

origem glacial até depósitos de carvão em pequenas bacias isoladas, sendo possível caracterizar os seguintes ambientes: fluvial, deltaico e marinho. A seqüência permiana se encerra com sedimentos fluviais.

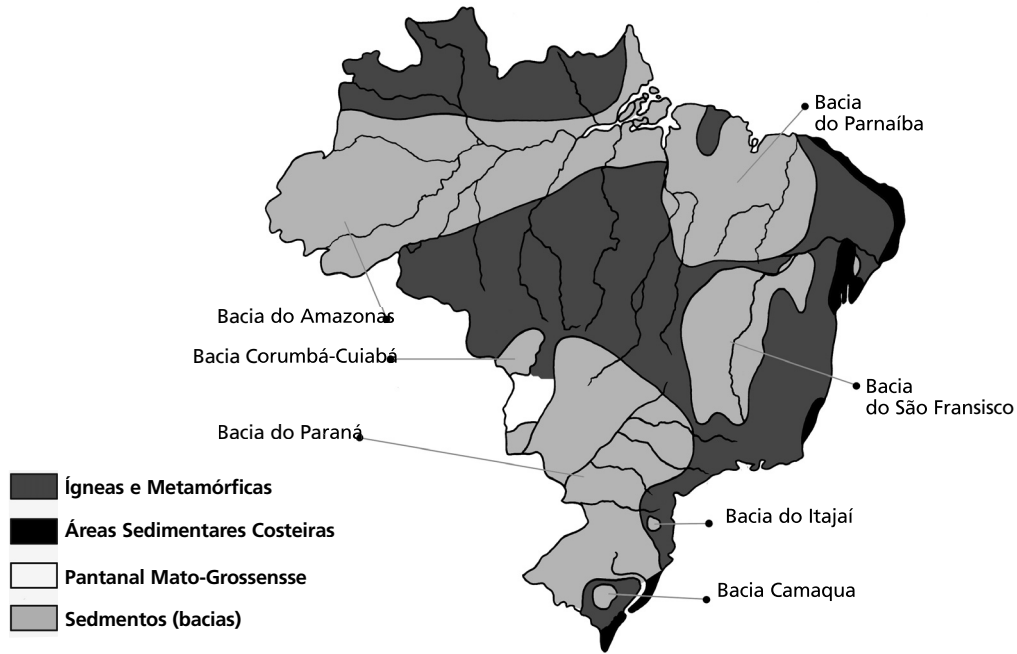


Figura 17.15: Esboço Geológico do Brasil, onde pode ser observada a extensão da Bacia Sedimentar do Paraná. Fonte: Popp, J.H. Geologia Geral Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, Cap. 22, Fig. 22.1, p. 314.

Observe na **Figura 17.16** a configuração dos continentes no Período Permiano da Era Paleozóica. Naquele tempo as terras emersas estavam reunidas em um grande continente, denominado Pangéia. A Bacia do Paraná se encontrava muito mais perto do Pólo Sul, na altura do Círculo Polar Antártico. Sendo assim, os ambientes sedimentares glacial e marinho se alternavam, sendo substituídos por outros ambientes ao longo da Era Mesozóica (Triássico, Jurássico e Cretáceo), quando o continente deslocou-se gradualmente em direção ao Equador.

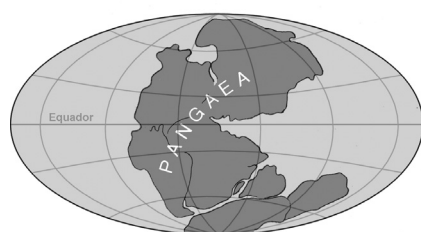
Durante a Era Mesozóica a deposição sedimentar continua na Bacia do Paraná, inicialmente com sedimentos lacustres e fluviais ricos em fósseis de répteis característicos do Período Triássico da Formação Rosário do Sul. Nas partes central e norte da bacia segue-se a deposição de sedimentos fluviais da Formação Pirambóia superpostos pelos sedimentos eólicos da Formação Botucatu. No início do Jurássico toda a bacia é um grande deserto, com deposição de sedimentos característicos. Inicia-se uma fase de atividade ígnea com espessos derrames de basalto (Formação

Serra Geral) que continuam até o final do Cretáceo. No noroeste do Paraná, sudoeste de São Paulo e no Rio Grande do Sul ocorrem sobre as camadas de basalto depósitos fluvio-lacustres e eólicos das Formações Caiuá, Baurú e Tupacipitã.

Este exemplo nos mostra como, ao longo de cerca de meio bilhão de anos, diferentes ambientes se sucederam na Região Sul do país, resultando na deposição de variados tipos de sedimentos intercalados com rochas ígneas. Estes sedimentos contêm um rico registro fóssilífero, cuja correlação com a idade das rochas pode fornecer importantes informações sobre a evolução biológica.

Tabela 17.2: Coluna estratigráfica simplificada da Bacia do Paraná (Fontes: Popp, J.H. 1999, 5a edição, Livros Técnicos e Científicos Editora; Mendes, J.C. 1977, Livros Técnicos e Científicos Editora; Petri, S. & Fúlvaro, V.J. 1983 Geologia do Brasil, EDUSP).

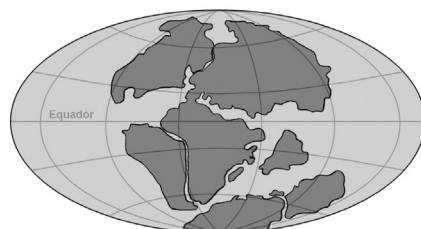
| Eras/Períodos | | Formação/espessura | Ambientes deposicionais/ rocha sedimentar | Fósseis |
|---------------|-------------|---|---|--|
| Cenozóica | Quaternário | Praias e aluviões | Praias e aluviões | |
| | Terciário | F. Paranaíba | | |
| Mesozóica | Cretáceo | Derrames de basalto (rocha vulcânica) intercalados com F. Caiuá F. Baurú/200m | Fluvial, lacustre e eólico/ arenito | Répteis (incluindo dinossauros), peixes, moluscos, crustáceos dicotiledôneas e coníferas |
| | | F. Botucatu | Desértico, eólico/ arenitos | Pistas atribuídas a dinossauros, mamíferos primitivos e coleópteros |
| | Triássico | F. Pirambóia | Fluvial/arenitos | Troncos silicificados de coníferas |
| | | F. Rosário do Sul | Lacustre/fluvial | Répteis diversos e dinossauros |
| Paleozóica | Permiano | F. Rio do Rasto F. Estrada Nova F. Irati F. Palermo F. Rio Bonito | Terrestre (fluvial, deltaico e ma-rinho)/ arenitos e folhelhos; camadas de carvão | Anfíbio labirintodonte; braquiópodes; gastrópodes; répteis Mesosaurus e Stereosternum |
| | Carbonífero | Grupo Tubarão, com várias formações/ 800 | Terrestre (glacial) intercalado com sedimentos marinhos | Fauna com pouca diversidade; flora Glossopteris |
| | Devoniano | F. Ponta Grossa | Marinho/folhelho | Invertebrados marinhos: moluscos, trilobitas |
| | | F. Furnas/200 a 300m | Terrestre (?)/ arenito | Afossilífera |
| | Siluriano | F. Vila Maria | Marinho/ arenito | Gastrópodos, braquiópodo |



PERMIANO
225 milhões de anos atrás



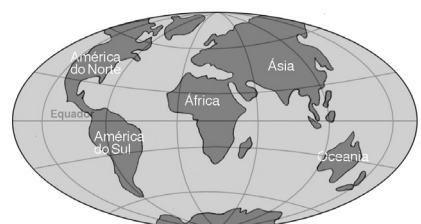
TRIÁSSICO
200 milhões de anos atrás



JURÁSSICO
135 milhões de anos atrás



CRETÁCEO
65 milhões de anos atrás



PRESENTE

Figura 17.16: De acordo com a teoria da deriva continental, o supercontinente Pangéia iniciou sua fragmentação 225 a 200 milhões de anos atrás, dando origem aos continentes que conhecemos hoje. Fonte: Kions, W.J. & Tilling, R.I. This Dynamic Earth: the story of plate tectonics, online edition, <http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html>

RESUMO

Nas aulas 3 e 4 você estudou os primórdios do nosso planeta, correspondendo aos **Éons Hadeano, Arqueano e Proterozóico**. Estes éons são informalmente agrupados sob a denominação de **Pré-Cambriano**. O Éon Fanerozóico, que teve início há 570 milhões de anos, apresenta grandes subdivisões, denominadas eras, e é conhecido de modo mais detalhado.

A vida primitiva, desenvolvida nos Éons Arqueano e Proterozóico, deixou poucos registros paleontológicos. O mais comum é a presença de **estromatólitos**, secreções produzidas por algas cianofícias.

A atmosfera primitiva provavelmente era redutora, e a atividade fotossintética das algas cianofícias contribuiu de forma decisiva para a transição que ocorreu no final do Pré-Cambriano, quando o oxigênio atmosférico atingiu cerca de 6% dos valores atuais.

O Éon Fanerozóico está subdividido em eras: paleozóica, mesozóica e cenozóica.

A **Era Paleozóica** (vida antiga) corresponde ao tempo decorrido entre **570 e 248 milhões de anos atrás**. Está subdividida nos períodos **Cambriano, Ordoviciano, Siluriano, Devoniano, Carbonífero e Permiano**.

Acredita-se que todos os organismos que viveram nos períodos Cambriano e Ordoviciano eram marinhos, sendo abundantes as algas e os invertebrados.

Existem registros de vida terrestre desde o Período Siluriano, sendo as plantas representadas pelas criptógamas e os invertebrados pelos gastrópodes e artrópodes.

O Período Devoniano marca a evolução dos peixes (provavelmente os primeiros vertebrados que existiram) e também sua transição para o continente.

Durante o Carbonífero as plantas criptógamas foram sendo substituídas pelas gimnospermas.

Os répteis surgiram no final da Era Paleozóica e foram os vertebrados predominantes durante o Período Permiano, bem como durante o Período Triássico da Era Mesozóica.

A **Era Mesozóica** (vida intermediária) corresponde ao tempo decorrido entre **248 e 65 milhões de anos atrás**. Está subdividida nos períodos **Triássico, Jurássico e Cretáceo**.

Durante a Era Mesozóica as gimnospermas eram as principais plantas de grande porte, e foram aos poucos sendo substituídas pelas angiospermas.

No final do Triássico os dinossauros eram o grupo de répteis dominante e conviviam com pequenos mamíferos.

No final da Era Mesozóica ocorreu a extinção em massa dos répteis.

A **Era Cenozóica** teve início 65 milhões de anos atrás. Está subdividida nos Períodos **Terciário e Quaternário**.

As plantas dominantes da Era Cenozóica são as angiospermas.

Os mamíferos se expandiram rapidamente durante a Era Cenozóica, e surgiram os primatas.

O homem de nossa espécie surgiu há 500.000 anos atrás.

Nas bacias sedimentares podemos encontrar o registro das variações climáticas e dos diferentes seres vivos presentes em uma região ao longo do tempo geológico.

EXERCÍCIOS

1. Desde que a Terra se formou os processos de intemperismo, erosão e transporte sedimentar vêm atuando. Sendo assim, por que não existe um registro contínuo dos seres vivos em rochas sedimentares?
2. Situe no tempo geológico o que é o Pré-Cambriano (Esta denominação é comumente dada a importância do Período Cambriano do ponto de vista evolutivo). Quais são as formas de vida conhecidas do Pré-Cambriano e como se acredita que era a atmosfera?
3. Quais são as conclusões que podemos tirar a respeito da presença de estromatólitos em rochas do pré-Cambriano?
4. Explique por que o Período Cambriano foi tão importante.
5. Quando teve início o Éon Fanerozóico? Em que eras este éon está subdividido?
6. Os primeiros organismos surgiram no ambiente marinho. Quando se deu a transição para o continente?
7. Quais foram as principais adaptações necessárias às plantas para sobreviver no ambiente terrestre?
8. A transição dos invertebrados para o continente não é muito clara no registro paleontológico, enquanto que a dos vertebrados está bem documentada. Justifique.
9. Quando surgiram os répteis? E os mamíferos?

10. Em que era geológica os mamíferos se expandiram e proliferaram?
11. Quando surgiram os primatas? E o homem?
12. O que é uma bacia sedimentar?
13. Por que existem estratos correspondentes à diferentes ambientes de deposição em uma bacia sedimentar?
14. Durante a Era Paleozóica o Oceano Atlântico já existia? E a Cordilheira dos Andes?
15. Os fósseis de organismos marinhos presentes em rochas do ordoviciano, siluriano e devoniano na bacia do Paraná atestam a ocorrência da invasão das águas marinhas continente adentro naqueles períodos geológicos (transgressão marinha). Qual foi o oceano que se acredita que invadiu o continente Sul-Americano naqueles períodos?

Leitura recomendada

McALESTER, A.L. História Geológica da Vida. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. 194p. (Série de textos básicos de geociência).

Sites recomendados

University of Califórnia. Museum of paleontology. Disponível em: <<http://www.ucmp.berkeley.edu>>. Acesso em: 25 maio 2005.

Encontre a opção “Discover the history of life” e aprenda um pouco mais sobre os conteúdos apresentados neste módulo.

Atmosfera e águas continentais

Introdução

Com este módulo iniciamos o estudo de vários processos que ocorrem na superfície do planeta, enfocando principalmente a Hidrosfera e a Atmosfera.

Você irá aprender a utilizar o conceito de Prisma Elementar, junto com a definição de geosferas e abundância dos elementos, na montagem de uma representação gráfica de uma paisagem. Tendo como base esta representação gráfica e o caminho que a água percorre através do ciclo hidrológico, iremos abordar as características físicas, químicas e biológicas das águas continentais e da atmosfera.

Este módulo começa analisando as chuvas e sua relação com a química atmosférica, investiga as modificações químicas sofridas pelas águas pluviais após sua precipitação nos continentes, e termina quando as águas fluviais alcançam a zona costeira e formam os estuários.

Alguns temas que têm relação direta com a nossa qualidade de vida, tais como efeito estufa e chuva ácida, são discutidos ao longo deste módulo.

**Entendendo
a paisagem.
Os conceitos
de geosferas
e prisma elementar**

AULAS

19/20

objetivos

- Conhecer os principais subsistemas que interagem na superfície da Terra – as Geosferas;
- Identificar os principais elementos químicos constituintes de cada geosfera;
- Reconhecer em uma paisagem os principais componentes e as geosferas correspondentes;
- Representar graficamente uma paisagem identificando as geosferas, bem como as principais entradas e saídas de água – o Prisma Elementar.

Pré-requisitos

Para entender melhor o conteúdo destas aulas, você precisa rever as partes das Aulas 3 e 4 referentes a geosferas e abundância de elementos.

Após o estudo dos processos geológicos relacionados com a origem e evolução da Litosfera até os dias de hoje, vamos entender alguns conceitos básicos necessários para o estudo dos processos que ocorrem atualmente na superfície da Terra. O primeiro, já visto em aulas anteriores, é o conceito de Geosfera, que representa a forma básica utilizada na estruturação de uma paisagem. O segundo é o conceito de Prisma Elementar, uma representação gráfica de uma paisagem que permite visualizar as principais interações entre as geosferas, bem como relacioná-las com os componentes desta paisagem.

REVISITANDO AS GEOSFERAS

O termo geosfera reporta-se à forma esférica do nosso planeta, e identifica os principais subsistemas que interagem no ambiente natural, a saber: **Atmosfera, Hidrosfera, Biosfera, Pedosfera e Litosfera**. Este conceito permite correlacionar os processos biogeoquímicos globais, com as características regionais e locais. Assim, em qualquer paisagem ao redor da Terra, você pode identificar as geosferas atuantes e utilizá-las no entendimento das interações envolvidas.

Como visto em aulas anteriores, a representação da Litosfera na superfície do planeta é a **crosta**. A Pedosfera consiste no produto da interação das outras geosferas na superfície terrestre, sendo composta por **solos e sedimentos**. A Hidrosfera é composta por **águas continentais** (ou doces) e **marinhas**, diferenciadas pela quantidade de elementos dissolvidos. A Biosfera engloba todos os **seres vivos**, e a Atmosfera é a fina **camada de gases** que envolve a Terra.

Um aspecto importante a ressaltar é a massa relativa entre as geosferas, ou seja, **na superfície da Terra qual a representatividade de cada geosfera?** É óbvio que esta representatividade varia de um local para outro (por exemplo: deserto x floresta). Mas para efeito ilustrativo vamos raciocinar em escala global, e considerar que a Biosfera representa 1 unidade. Proporcionalmente, a Atmosfera consistiria de 300 unidades, a Hidrosfera 69.000 unidades, e finalmente a Litosfera 1.000.000 unidades. Assim, do ponto de vista de massa, observa-se que os seres vivos compõem uma pequena fração das paisagens, dominadas amplamente por rochas (incluindo também solos e sedimentos).

COMO RECONHECER AS GEOSFERAS NA PAISAGEM?

Para exercitar a identificação das geosferas em uma paisagem, podemos trabalhar dois exemplos. O primeiro a considerar é quando você chega numa praia. O que primeiro chama a atenção é o mar, que é o componente da paisagem que representa a **Hidrosfera**. Outro é a areia, geralmente composta de grãos de quartzo, que nada mais é do que a **Pedosfera**. Caso a sua praia seja em uma área com pouca urbanização, você terá grandes chances de observar uma vegetação cobrindo parcialmente a faixa de areia – a vegetação de restinga – que representa a Biosfera. Temos outros representantes da Biosfera, tais como caranguejos, algas e peixes, e porque não, seres humanos. Ao olhar para o céu azul, lembre-se que estamos todos envolvidos por uma fina camada de gases chamada **Atmosfera**. Dependendo da porção do litoral do Estado do Rio de Janeiro (Cabo Frio, por exemplo), você poderá estar cercado de grandes rochas que mergulham no mar, ou avistar ao longe uma série de morros. Eles servem para nos lembrar de que em sub-superfície existe um embasamento rochoso, a **Litosfera**. Esta seria uma descrição inicial, que poderia incluir outros detalhes, tais como o lençol freático.

Um segundo exemplo pode ser um rio. Quando você chega na margem de um rio a presença da **Hidrosfera** é evidente. Os solos em torno e o sedimento de fundo do rio representam a **Pedosfera**. Algumas vezes podemos observar um tipo de vegetação que cresce na beira da água, **MACRÓFITAS AQUÁTICAS**, que são uma parte da Biosfera, como também o são os peixes e o **FITOPLÂNCTON** presentes nas águas fluviais. Caso seja um rio de serra, provavelmente você poderá observar que em diversos trechos a água corre diretamente sobre as rochas (corredeiras), ou seja **Litosfera**. Novamente devemos lembrar do envelope de gases que nos cerca, a **Atmosfera**.

A distribuição de alguns elementos maiores identifica cada geosfera, sendo responsáveis pelas principais características do meio (Tabela 3, Aulas 3 e 4). Por exemplo, a abundância de oxigênio, silício e alumínio na Crosta reflete a dominância dos silicatos (por exemplo, feldspato) na sua composição. Da mesma forma a salinidade elevada da água do mar (devido à grande quantidade de elementos dissolvidos),

MACRÓFITAS AQUÁTICAS

Vegetais que habitam desde brejos até margem de lagos.

FITOPLÂNCTON

Algas planctônicas (flutuantes) que realizam fotossíntese.

quando comparada com as águas doces (baixas quantidades de elementos dissolvidos), faz com que o fitoplâncton marinho seja diferente do encontrado nas águas continentais, uma vez que ele tem que ser fisiologicamente adaptado à água salgada. Cabe ressaltar que apenas 15 elementos formam a estrutura básica das geosferas.



Atenção: Repasse a matéria referente à Tabela 3 nas Aulas 3 e 4

A Pedosfera é formada a partir da alteração (intemperismo) das rochas, sendo seus elementos mais abundantes os mesmos que compõem a Litosfera, só que organizados em minerais diferentes – os argilominerais (por exemplo caolinita). Na Atmosfera concentram-se os elementos que têm uma fase gasosa importante no seu ciclo biogeoquímico, tais como nitrogênio e oxigênio. Elementos como cálcio e potássio, que não se apresentam na forma gasosa na natureza, não estão presentes no envelope de gases que circunda a Terra, apesar de abundantes em outras geosferas.

Os elementos utilizados pela Biosfera na síntese de compostos orgânicos, como por exemplo carbono e nitrogênio, não são necessariamente os mais abundantes na Litosfera. Silício, alumínio e ferro, apesar de disponíveis em grande quantidade tanto na Litosfera quanto na Pedosfera, não são elementos essenciais para os seres vivos.

As geosferas interagem entre si na superfície terrestre, sendo que movido pela energia solar e pelo calor interno do planeta, matéria e energia ciclam entre as geosferas, definindo clima, influenciando a formação de solos e afetando todos os seres vivos. Na **Figura 1** são representados os principais mecanismos de interação entre as geosferas, quais sejam, o ciclo das rochas (ver Aula 8), a ciclagem biogeoquímica na biosfera (ver Aula 1) e o ciclo hidrológico (Aula 1).

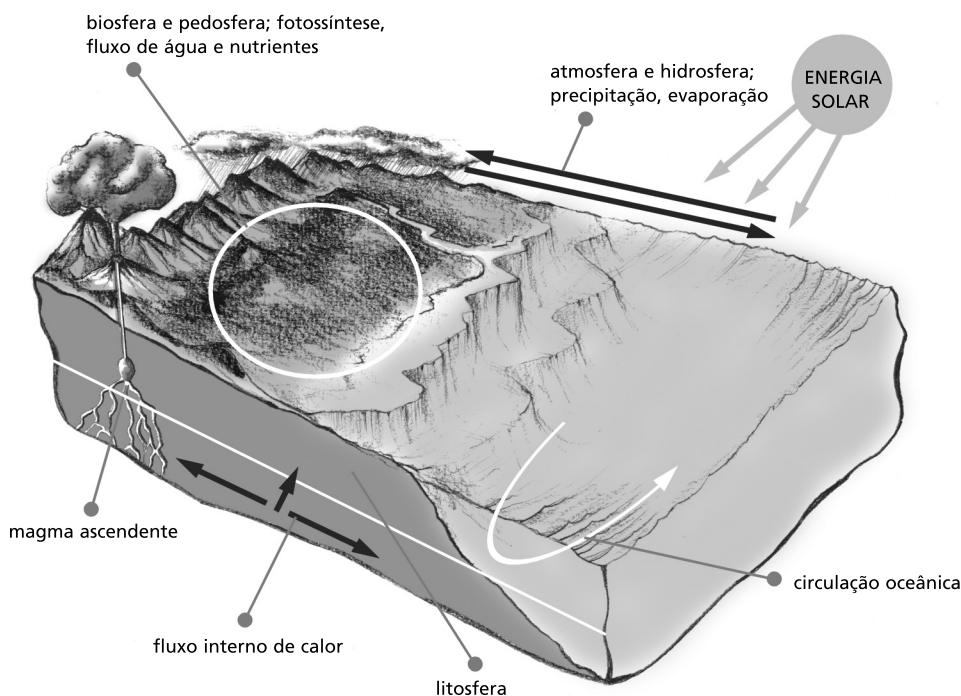


Figura 1: Representação da interação das geosferas na superfície da Terra, ressaltando as fontes de energia para os processos atuantes – energia solar e calor interno do planeta. Adaptado de: modificada de PRESS, F.; SIEVER, R. *Understanding Earth*. New York: W.H. Freeman and Co., 2000. p. 12

O PRISMA ELEMENTAR

A questão central, quando se deseja entender os processos atuantes na superfície da Terra, é como estruturar a paisagem de interesse, identificando seus principais componentes. O conceito de prisma elementar permite uma representação gráfica simplificada de um determinado cenário, onde as relações entre as geosferas e os componentes da paisagem podem ser identificados com facilidade. Na **Figura 2** temos um prisma elementar de um ecossistema florestal, onde estão identificadas as geosferas envolvidas e seus correspondentes na paisagem. Assim a Litosfera tem nas rochas sua representação no prisma, enquanto a cobertura vegetal é parte integrante da Biosfera.

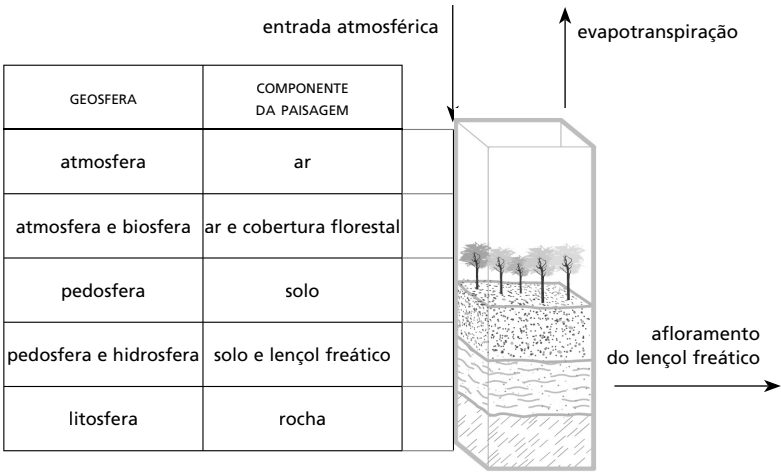


Figura 2: Prisma elementar de um ecossistema florestal, com principais entradas e saídas de água.

Como montar um prisma elementar?

A montagem de um prisma elementar, como por exemplo de um ecossistema florestal, começa pelo desenho de uma unidade de volume na forma de um prisma alongado (**Figura 3**).

O primeiro componente a ser desenhado é o embasamento rochoso na base da figura. Acima das rochas define-se uma porção do prisma para representar o solo, e acima do solo posiciona-se a vegetação. O lençol freático localiza-se na parte inferior do solo próximo ao contato solo-rocha. Nesta porção do solo os poros estão preenchidos por água (neste caso o solo é dito saturado), enquanto na parte acima do lençol os poros do solo são preenchidos por gases (neste caso o solo é não-saturado).

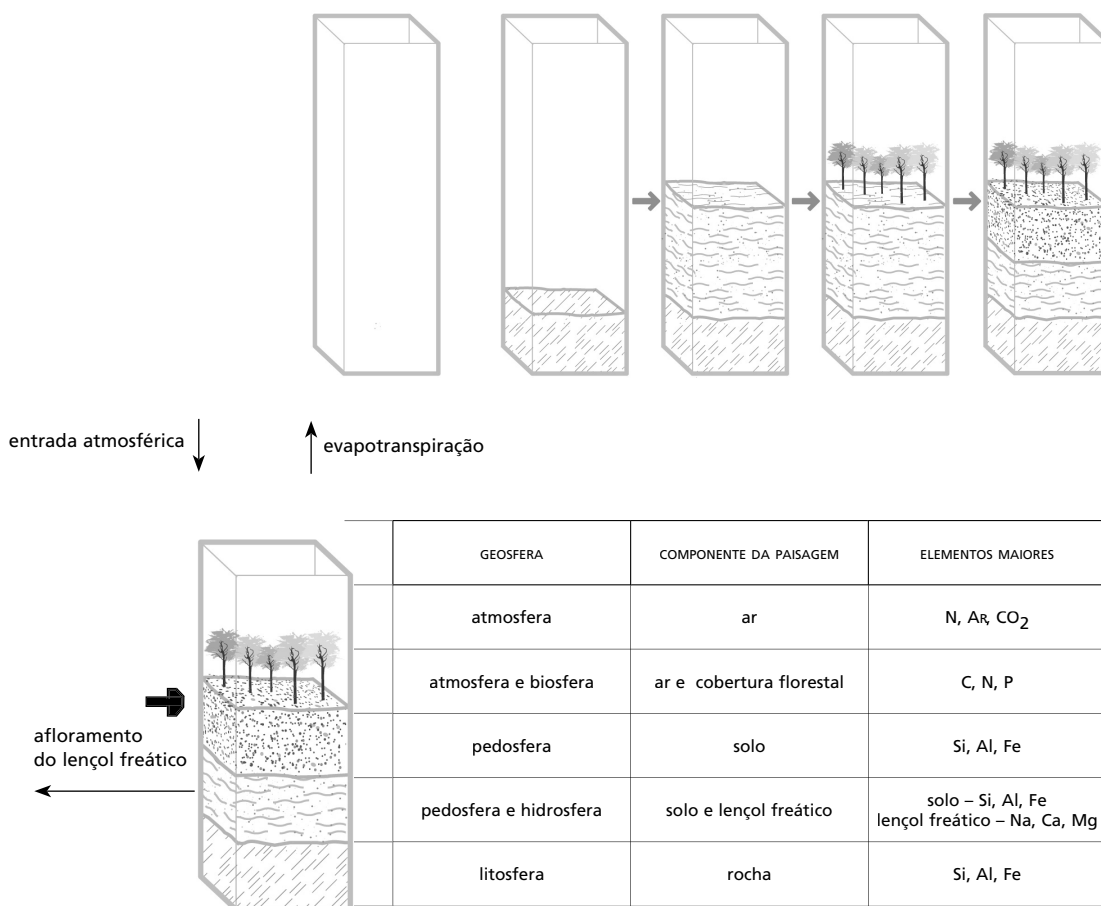


Figura 3: Seqüência de montagem de um prisma elementar de um ecossistema florestal em 6 passos (ver detalhes no texto).



Atenção: Deve-se enfatizar que o lençol freático não é “um grande espaço dentro do solo cheio de água”, mas sim uma porção do solo onde “os poros são preenchidos por água”. Quando se fura um poço para obter água, a perfuração tem que atingir a profundidade onde os poros do solo estão cheios de água. Caso contrário o poço será seco.

Talvez pelo fato de ser transparente e incolor, o envelope de gases que cobre a superfície da Terra tende a ser esquecido na construção do prisma. Porém, como veremos nas aulas seguintes, o ar, juntamente com a água, são os principais agentes transportadores de massa no ambiente. Um exemplo da capacidade de transporte da atmosfera é a formação de frentes frias próximo ao Pólo Sul, e sua migração em direção norte através do continente sul-americano, contribuindo para formação de chuvas ao longo do seu percurso.

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

É o termo utilizado para agrupar o processo de evaporação com o de transpiração das plantas, que ocorre em áreas com cobertura vegetal.

AFLORAMENTO DO LENÇOL FREÁTICO

É quando a zona saturada do solo emerge na superfície do terreno, geralmente em fundos de vales (geralmente formando rios) ou depressões (geralmente formando lagos).

SEDIMENTO DE FUNDO

Sedimento acumulado no fundo de um ecossistema aquático, seja ele um rio ou um lago.

Devido à importância da água como agente transportador de massa, uma vez montado o prisma, torna-se necessário identificar as **principais entradas e saídas de água do cenário**. No caso da **Figura 3** a entrada de água é via atmosfera (**chuva**), e a saída acontece tanto por **EVAPOTRANSPIRAÇÃO** como pelo **AFLORAMENTO DO LENÇOL FREÁTICO** formando rios ou lagos. Complementando o prisma com os elementos mais abundantes em cada componente da paisagem, obtém-se em uma única representação gráfica uma série de informações relevantes para o entendimento do cenário escolhido.

O conceito de prisma elementar funciona como uma ferramenta auxiliar na estruturação de uma paisagem. Ele pode ser aplicado também em situações onde a intervenção humana se faz presente. Em um agro-ecossistema, tomando como exemplo uma plantação de cana-de-açúcar na região Norte Fluminense, o prisma elementar terá duas diferenças básicas: a mata nativa será substituída pela monocultura, e teremos que incluir outra entrada de água – a irrigação. Com o cenário montado, torna-se fácil compreender como os produtos da fertilização e do uso de agrotóxicos pode percolar através do solo, atingir o lençol freático, e, eventualmente, contaminar rios e lagos.

Você pode usar o mesmo raciocínio para visualizar o impacto potencial de um aterro sanitário sobre o solo e os recursos hídricos adjacentes, ou seja, substituindo a vegetação pelo aterro. A questão dos elementos mais abundantes no aterro pode ser abordada listando os materiais que ali são depositados – latas, papel, plásticos, vidro, restos orgânicos, pilhas, dentre outros – e observando, por exemplo, que papel e restos orgânicos são feitos a partir da Biosfera, as latas são feitas de alumínio e outros metais oriundos da Litosfera e/ou Pedosfera.

Quando o cenário de interesse é um ecossistema aquático, por exemplo uma lagoa que recebe água de uma bacia de drenagem, pode-se também montar um prisma elementar correspondente. Na **Figura 4** observamos que neste ambiente a **Pedosfera** é representada pelo **SEDIMENTO DE FUNDO** do lago, e que ao aporte de água pelo rio e do lençol freático oriundos da bacia de drenagem soma-se a entrada atmosférica.

A **Hidrosfera** estende-se desde dentro do sedimento de fundo, onde o lençol freático é substituído pela **ÁGUA INTERSTICIAL** (poros/interstícios saturados de água), até a **COLUNA D'ÁGUA**. A **Biosfera** está representada pelo fitoplâncton, o zooplâncton e os peixes (dentre outros organismos). Desta forma, pode-se entender como uma mudança de uso do solo nas margens do rio, p.ex. lançamento de esgoto doméstico, pode ter seus reflexos dentro da lagoa.

Cabe ressaltar que o prisma da **Figura 4** representa as principais feições da lagoa, sendo supostamente localizado na parte central desta. Sabe-se que nas margens de muitas lagoas podem ocorrer áreas mais rasas colonizadas por **macrófitas aquáticas**, que não estão representadas na figura, e que podem constituir um outro prisma. Desta forma podemos constatar que um determinado ecossistema, seja ele floresta ou lagoa, pode ser desmembrado em mais de um prisma, dependendo do nível de informação que se deseja representar.

ÁGUA INTERSTICIAL

Água presente nos interstícios/poros de sedimentos.

COLUNA D'ÁGUA

Termo empregado para designar a porção da hidrosfera que nos ecossistemas aquáticos, como lagos, começa na superfície da água e estende-se até o sedimento de fundo (ver **Figura 4**).

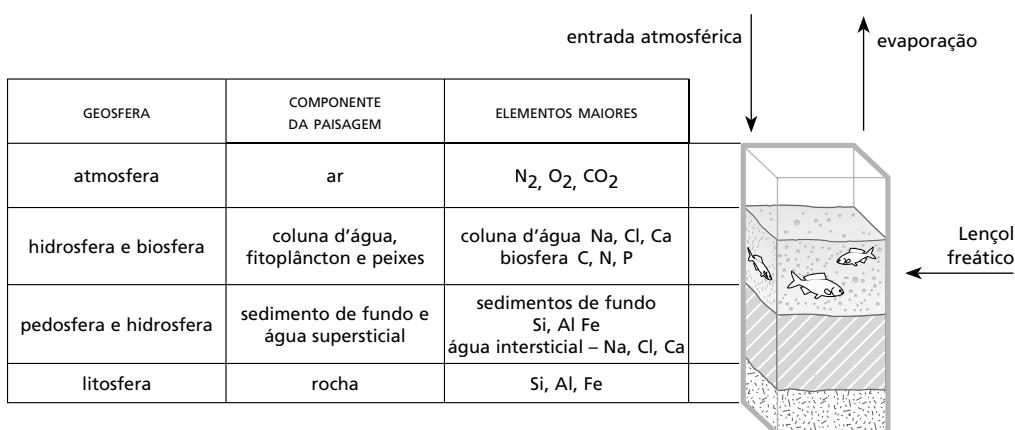


Figura 4: Prisma elementar de um ecossistema aquático, incluindo elementos maiores em cada geosfera, e principais entradas e saídas de água.

RESUMO

Nestas duas aulas foram enfocados os conceitos de geosferas e prisma elementar. Estudamos a forma de utilizá-los para, literalmente, “montarmos” uma paisagem qualquer de interesse. Descobrimos que, se juntarmos nesta montagem os elementos maiores em cada componente da paisagem e as principais entradas e saídas de água, teremos em um mesmo diagrama informações suficientes para:

1. entendermos as principais interações entre as geosferas
2. fazer uma avaliação preliminar do impacto de ações antrópicas.

Esta forma de “olhar” as paisagens pode ser aplicada não só em áreas naturais, como também artificiais (por exemplo um tanque de cultivo de peixes).

EXERCÍCIO

Desenhe o prisma elementar de uma plantação de cana de açúcar, identificando os principais componentes da paisagem, as geosferas envolvidas, e as principais entradas e saídas de água. Liste 3 elementos e/ou compostos abundantes em cada compartimento da paisagem, além de oxigênio e hidrogênio.

PARA REFLEXÃO

Se a parte superior do solo tem seus poros preenchidos por gases (solo não-saturado), então o “envelope de gases que circunda a Terra” deve se estender um pouco abaixo da superfície. Se na atmosfera temos a presença de nuvens (vapor d’água) então a hidrosfera se prolonga acima da superfície da Terra. Dessa forma observa-se que a definição de limites entre as geosferas na natureza não é tão simples quanto nas ilustrações. Os prismas são representações simplificadas das paisagens.

Sugestões de leitura

PRESS, Frank; SIEVER, Raymond. *Understanding earth*. New York: W.H. Freeman and Company, 2000. Cap. 1.

FORTESCUE, John A.C. *Environmental Geochemistry: a holistic approach*. New York: Springer-Verlag, 1980. (Ecological Studies; 35). Cap. 2.

Composição química da atmosfera e das chuvas

AULAS

21/22

objetivos

- Conhecer a composição química de gases e partículas presentes na atmosfera;
- Avaliar a importância das fontes de gases e partículas para a atmosfera na composição química das águas de chuva;
- Relacionar os conceitos acima com os fenômenos de Chuva Ácida e Efeito Estufa;

Pré-requisitos

Antes de iniciar estas aulas, repasse a matéria referente ao Ciclo Hidrológico na Aula 1.

INTRODUÇÃO

ÁGUAS PLUVIAIS

Denominação utilizada para identificar as águas de chuva.

FONTES ANTRÓPICAS

Termo usado para designar o conjunto de atividades humanas, tais como: indústrias, agricultura e urbanização, que liberam elementos ou compostos químicos no meio-ambiente.

AEROSSÓIS

Partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera.

Nestas aulas serão discutidas a composição química de gases e partículas presentes na atmosfera, identificando suas principais fontes, bem como seu reflexo nas características químicas das **ÁGUAS PLUVIAIS**. Veremos que existe uma variação espacial na composição química das chuvas relacionada com as diferentes fontes de materiais presentes na atmosfera, inclusive **FONTES ANTRÓPICAS** que aumentam a acidez natural das chuvas. Nestas aulas também iremos avaliar os principais aspectos de uma consequência global da poluição atmosférica – o efeito estufa.

O “ENVELOPE” DE GASES QUE ENVOLVE A TERRA

A maior parte da água presente na atmosfera (mais de 95%) está na forma de vapor. Durante o processo de condensação e formação de nuvens, e conseqüentemente das chuvas, uma série de reações químicas ocorrem entre os materiais presentes na atmosfera e a água. Apesar da noção de que a água da chuva é pura e constituída apenas de H_2O , uma série de substâncias são incorporadas pelas gotas de chuva durante seu percurso através da atmosfera até o solo, sendo o produto final uma solução diluída. Desta forma observamos que a composição química das águas pluviais é um reflexo dos materiais presentes na atmosfera. Estes materiais são constituídos de gases e partículas sólidas e líquidas. Estas partículas recebem a denominação genérica de **AEROSSÓIS**. Os gases atmosféricos são dominados (> 99,9% do volume total) por nitrogênio, oxigênio e argônio (**Figura 1**), cuja proporção entre eles tem se mantido constante em uma escala de tempo humana. O conteúdo de vapor d'água varia de 1 a 4% em volume.

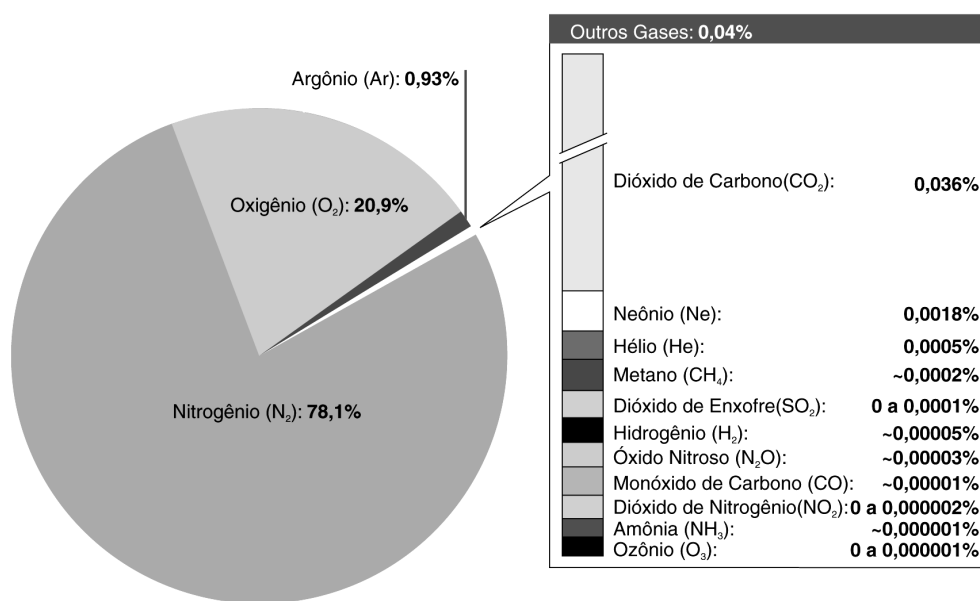


Figura 1: Composição dos gases presentes na atmosfera; valores em % por volume de ar; vapor d'água e aerossóis não estão incluídos. Fonte: modificado de MURCK, B.; SKINNER, B. *Geology today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons, 1999. p. 369.



Atenção: A atmosfera não é um pacote homogêneo de gases e partículas. Ela é composta de camadas, estendendo-se até 120 Km de altitude. A composição de gases apresentada na Figura 1, refere-se à **TROPOSFERA**, camada que se estende da superfície da Terra até 15 Km de altitude, e que contém 80% da massa da atmosfera. Ou seja, os processos formadores do clima e os gases da atmosfera que fazem parte do sistema de suporte de vida do nosso planeta (por exemplo, oxigênio), ocorrem apenas neste fino envelope próximo à superfície. Apenas 15 Km!!

TROPOSFERA

Camada mais baixa da atmosfera, que se estende da superfície da Terra até 15 Km de altitude, onde ocorrem os processos controladores do clima, e localizam-se os gases necessários à manutenção da biosfera.

Em relação a outros gases menos abundantes, observamos que os mesmos são afetados pelas emissões originadas de atividades humanas, tanto em escala local como global. Dentre eles podemos citar o metano (CH₄), a amônia (NH₃), o ozônio (O₃), os óxidos de nitrogênio (NO₂, NO e N₂O), o dióxido de enxofre (SO₂) e o dióxido de carbono (CO₂). Todos estes gases têm aumentado sua concentração na atmosfera nos últimos 100 anos. O dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás responsável pelo **EFEITO ESTUFA**, enquanto SO₂, NO₂ e NH₃ influenciam a composição das chuvas causando o fenômeno chamado **CHUVA ÁCIDA**. Estes dois fenômenos provocados pela atividade humana serão vistos ao final destas 2 aulas nos seus aspectos principais.

EFEITO ESTUFA

Processo natural que regula a temperatura na superfície da Terra, tendo o CO₂ atmosférico como seu principal ator; a ação do homem tem intensificado este processo através da queima de combustíveis fósseis, provocando alterações climáticas.

CHUVA ÁCIDA

Termo utilizado para designar águas de chuva cujo pH são menores que 5,7; pode ser natural ou de origem antropogênica.

OS AEROSSÓIS – PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO NA ATMOSFERA

μm

Corresponde a 10^{-6} metros, ou 0,000001 m, e se lê micrômetro.

O termo **aerossol** é empregado para designar pequenas partículas de sólidos e líquidos em suspensão na atmosfera. Seu tamanho varia de um aglomerado de poucas moléculas até 20 μm de raio (partículas maiores não permanecem muito tempo no ar). Uma vez que o vapor d'água da atmosfera se condensa ao redor de uma partícula, a composição química das chuvas reflete a natureza dos aerossóis. Por isso, nós devemos entender a origem e a composição dos aerossóis atmosféricos.

Se nós observarmos a figura do ciclo hidrológico (Aula 1) podemos constatar que, de uma forma bem geral, duas grandes paisagens se destacam: continentes e oceanos. Estas duas paisagens além de emitirem vapor d'água, contribuem também com aerossóis para atmosfera em escala global. Assim temos dois grandes grupos de fontes de aerossóis: continental e marinha. A fonte continental inclui solos, vegetação e emissões gasosas de áreas alagadas (exemplo: Pantanal Mato-grossense), enquanto a fonte marinha é formada unicamente pelo “spray” originado do oceano (maresia). As emissões gasosas de áreas alagadas liberam na atmosfera compostos de enxofre e nitrogênio originados de processos naturais, tais como **DESNITRIFICAÇÃO** e **SULFATO-REDUÇÃO**.

DESNITRIFICAÇÃO

Processo natural mediado por bactérias que produz compostos gasosos de nitrogênio a partir da decomposição da matéria orgânica; ocorrem em áreas alagadas, tais como brejos e manguezais.

SULFATO-REDUÇÃO

Processo natural mediado por bactérias que produz compostos gasosos de enxofre a partir da decomposição da matéria orgânica; ocorrem em áreas alagadas, tais como brejos e manguezais.

Fontes secundárias, porém não menos importantes, são as erupções vulcânicas e as atividades antrópicas. Geralmente estas fontes atuam de forma pontual, por exemplo: vulcões, ou em escala local, como a queima de combustíveis fósseis em grandes centros urbanos. Frequentemente observamos no noticiário reportagens sobre vulcões em erupção, que injetam na atmosfera enormes quantidades de gases e partículas. Esse fenômeno ocorre durante um curto período de tempo, sendo sua origem uma cratera vulcânica de algumas dezenas/centenas de metros de diâmetro. Se comparado à fonte marinha (contínua e em escala global), estas emissões são consideradas pontuais e de duração definida (dias a algumas semanas). Devido a grande quantidade de gases e partículas injetadas na atmosfera em um curto intervalo de tempo, os efeitos na química atmosférica são agudos.



Atenção: Você já deve ter visto várias vezes nos jornais e na televisão reportagens sobre a qualidade do ar nas grandes cidades brasileiras, com destaque para São Paulo (cidade que inclusive adota o rodízio de carros para tentar minimizar o problema). Principalmente no inverno, quando o aquecimento da atmosfera é menor, a dispersão dos poluentes originados dos motores de carros e ônibus não é eficiente, provocando uma “nuvem” de poluição sobre a cidade. Esta “nuvem” só é desfeita por ventos fortes ou chuva. A chuva literalmente “lava” a atmosfera, ou seja, ao condensar o vapor d’água carrega consigo grande parte dos aerossóis em suspensão. Será que isto resolve o problema? Não, pois apenas transfere os poluentes da atmosfera para o solo e as águas superficiais (rios e lagos).

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS ÁGUAS PLUVIAIS – CARACTERÍSTICAS GERAIS

Pelo que vimos até o momento, os compostos e/ou elementos dissolvidos na água da chuva são oriundos de gases e aerossóis presentes na atmosfera. Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- são exemplos de elementos presentes na água da chuva originados de aerossóis, enquanto SO_4^{2-} , NH_4^+ e NO_3^- têm como fonte gases atmosféricos. Por outro lado, os gases e aerossóis têm uma variedade de fontes, e a associação de elementos que resultam destas fontes são apresentadas na **Figura 2**. Estas associações são como a “assinatura química” das fontes. Note que um elemento ou composto, por exemplo sódio (Na^+), pode ter mais de uma fonte.

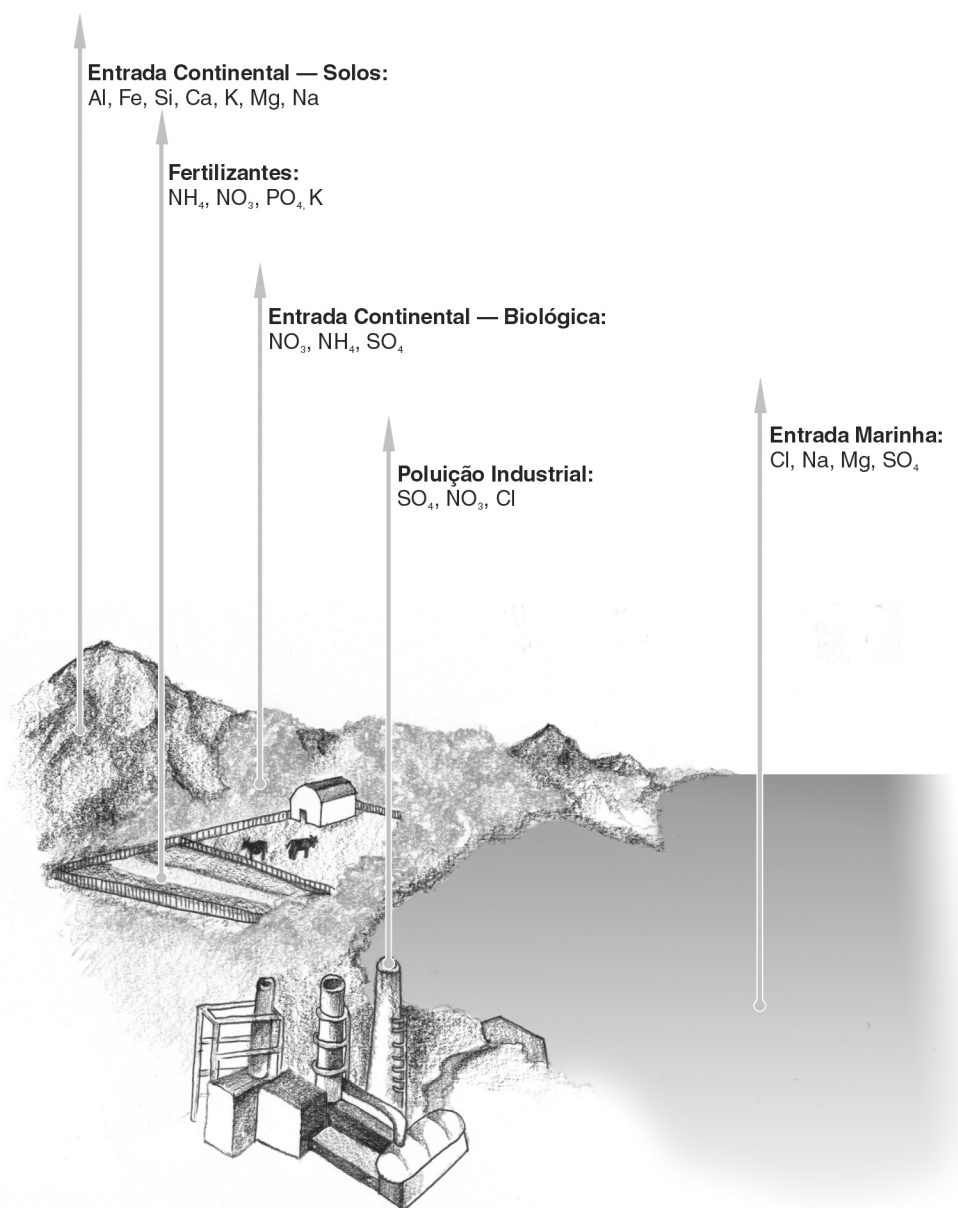


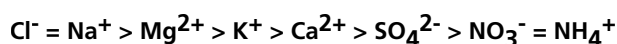
Figura 2: Fontes de elementos para as águas pluviais e sua respectiva associação de elementos. Fonte: modificado de BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. cap. 2.



Atenção: Compare as associações da **Figura 2** com a abundância dos elementos nas geosferas (Aulas 3 e 4). Observe a semelhança entre ambas – por exemplo – a associação de elementos da entrada de solos com os elementos maiores na pedosfera. Este é um exemplo da importância de você memorizar a abundância dos principais elementos em cada geosfera. Ela irá ser utilizada até o final do curso, facilitando a compreensão dos processos envolvidos.

Observe na **Figura 2** que os compostos associados ao uso de fertilizantes em agricultura são familiares para as pessoas que gostam de plantas e têm vasos em casa, ou seja, N-P-K em proporções variadas, que é a composição dos adubos utilizados pelo público em geral. Os compostos listados na mesma figura como exemplo de “assinatura química” de poluição industrial são os compostos que, quando em solução, formam ácidos (HCl, HNO₃ e H₂SO₄), originando a chuva ácida.

A composição química das águas pluviais muda de uma região para outra em função das fontes atuantes. A importância relativa entre as fontes continental e marinha varia de acordo com a distância do mar, de maneira que uma hierarquização dos íons pode ser feita em função da proporção entre as fontes:



Fonte Marinha Dominante

Fonte Continental Dominante

Dentre os principais cátions, o sódio (Na⁺) é dominante nas águas de chuva em áreas costeiras, como por exemplo Cabo Frio (RJ), enquanto o cálcio (Ca²⁺) é o cátion dominante em chuvas que ocorrem no interior do país, como por exemplo Brasília (DF). Assim, na medida que nos afastamos do mar em direção ao interior do continente, a composição química das chuvas muda de acordo com a hierarquização acima.



Lembre-se: Isto não significa que a chuva que cai numa restinga, um ecossistema costeiro, não tenha uma componente continental na sua composição química. As duas fontes estão sempre presentes, só que na beira do mar a fonte marinha é dominante, e no interior a fonte continental prevalece. Na Bacia Amazônica a componente marinha na água da chuva é detectada até 2.000 Km longe da costa. As fontes não são excludentes.

As águas pluviais são consideradas uma solução diluída, independente da chuva ocorrer na praia ou no cerrado. A **Tabela 1** nos mostra a faixa de valores típica para os íons maiores dissolvidos em águas de chuva numa região costeira e no interior do continente. Se somarmos a concentração dos elementos presentes na água da chuva continental ou costeira, por exemplo 1 mg Na/L + 0,5 mg Mg/L + 0,3 mg K/L + 3 mg Ca/L + ..., observamos que a quantidade de elementos dissolvidos em uma água de chuva varia entre 10-20 mg/L, enquanto em rios ficam em torno de 200-1000 mg/L e no mar 35.000 mg/L.

Tabela 1: Concentrações típicas de íons maiores em chuvas continentais e costeiras (em mg/L). Fonte: modificado de BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. Cap. 3.

| Íon | Chuva Continental | Chuva Costeira |
|-------------------------------|-------------------|----------------|
| Na ⁺ | 0,2 – 1 | 1 – 5 |
| Mg ²⁺ | 0,05 – 0,5 | 0,4 – 1,5 |
| K ⁺ | 0,1 – 0,3 | 0,2 – 0,6 |
| Ca ²⁺ | 0,1 – 3,0 | 0,2 – 1,5 |
| NH ₄ ⁺ | 0,1 – 0,5 | 0,01 – 0,05 |
| Cl ⁻ | 0,2 – 2 | 1 – 10 |
| SO ₄ ²⁻ | 1 – 3 | 1 – 3 |
| NO ₃ ⁻ | 0,4 – 1,3 | 0,1 – 0,5 |

Para efeito de comparação, uma chuva pode ser considerada costeira se ela ocorrer até 40 Km do litoral. É óbvio que outros fatores como o relevo podem alterar este valor. Caso uma cadeia de montanhas ocorra bem próximo da costa, ela constitui uma barreira física para os aerossóis marinhos. Neste caso pode ocorrer uma dominância das fontes continentais nas águas de chuva a uma distância bem menor do que 40Km da costa.

Na chuva costeira os elementos associados com a fonte marinha (Cl⁻, Na⁺ e Mg²⁺; conferir na **Figura 2**) apresentam concentrações maiores do que na chuva continental (**Tabela 1**). Observe que, mesmo em uma chuva costeira, encontramos NH₄⁺ e NO₃⁻ por exemplo, compostos típicos de fonte continental (**Tabela 1**). Em áreas poluídas os valores da **Tabela 1** podem ser drasticamente alterados, com a amônia atingindo valores entre 1 e 2 mg/L, e o sulfato variando entre 3 e 8 mg/L.

O PH DAS ÁGUAS PLUVIAIS – CHUVA ÁCIDA

Antes de iniciarmos a discussão sobre os fatores que afetam a acidez da água da chuva, vamos repassar o conceito de pH. Você já deve saber que o pH é definido como o logaritmo negativo (base 10) da concentração do íon hidrogênio (H⁺):

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = \log 1/[\text{H}^+]$$

Aqui os colchetes representam a concentração em moles por litro (mol/L). A escala de variação do pH vai de 1 a 14. **Soluções que têm pH acima de 7 são chamadas de básicas** (ou alcalinas), e quando o valor do pH é abaixo de 7 são chamadas ácidas.

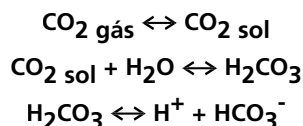


Observação: A concentração de H^+ é normalmente expressa em termos de atividade, não de molaridade, porém o uso deste conceito foge ao escopo desta disciplina.

A água pura sem nenhuma substância em solução deve ter o **pH igual a 7** sendo, neste caso, chamada de uma **solução neutra**. A água da chuva natural (não poluída) por mais diluída que seja, não é água pura. A interação entre a água da chuva e o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera (**Figura 1; ~ 360 PPM**) torna a chuva naturalmente ácida, com um pH de 5,7. Isto ocorre pela reação do CO_2 com H_2O , que resulta na formação do ácido carbônico (H_2CO_3), que por sua vez se dissocia parcialmente produzindo íons hidrogênio (H^+) e bicarbonato (HCO_3^-):

PPM

Parte por milhão;
10 ppm, lê-se
10 partes por milhão.



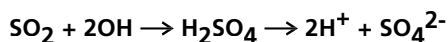
(A seta dupla representa que a reação parcial tende ao equilíbrio químico).

Existem casos onde o pH de uma chuva natural pode ser menor do que 5,7? Sim, quando em presença de uma fonte natural de compostos de enxofre (por exemplo, SO_2), que ao reagir com a água forma ácido sulfúrico (H_2SO_4). Essa fonte natural estaria associada à oxidação de matéria orgânica por **sulfato-redução**, um processo que ocorre naturalmente em áreas alagadas. Assim, considerando as emissões naturais de compostos de enxofre, poderíamos considerar o pH de 5,0 um valor normal para determinadas áreas (na Bacia Amazônica o pH da água da chuva está em torno de 5,0), uma vez que a emissão de compostos gasosos de enxofre para a atmosfera varia de uma região para outra. Como o termo chuva ácida é aplicado para águas pluviais com um pH menor do que 5,7 devido a reações com outros gases que não o CO_2 , podemos concluir que este fenômeno pode ser natural.

NO_x

Fórmula geral empregada para designar o conjunto de óxidos de nitrogênio gasosos, N₂O e NO.

Os assim chamados gases ácidos, no nosso caso SO₂, NO₂ e NO_x (N₂O e NO), quando injetados na atmosfera reagem quimicamente com os aerossóis, resultando na formação de ácidos que dissociam na água da chuva formando íons H⁺:



(ácido sulfúrico)



(ácido nítrico)

Assim, quanto mais gases são liberados para a atmosfera pelas atividades humanas, mais íons hidrogênio são produzidos e o pH da chuva diminui. Isto ajuda a explicar como o pH da chuva em alguns locais está diminuindo com o passar dos anos.

CHUVA ÁCIDA NO BRASIL

O fenômeno da chuva ácida foi identificado no Brasil já em 1979, na cidade de Cubatão (SP), com valores de pH alcançando 3,7 (lembre-se de que para descer o valor do pH de 4 para 3 você tem que aumentar em 10 vezes a concentração de H⁺; é uma função logarítmica).

A **Tabela 2** apresenta a faixa de pH de água de chuva em algumas regiões do Brasil.

Tabela 2: Faixa de variação de valores de pH em águas pluviais em algumas áreas no Brasil. Fonte: OVALLE, Alvaro Ramon C., SILVA FILHO, Emmanoel V. Acid precipitation research in Brazil: a short review. In: LONGHURST, James W.S.[Ed.]. *Acid Deposition: Origins Impactis and Abatement Strategies*. Berlin: Springer Verlag, 1992. p.53.

| Local | Faixa de pH |
|--------------------------|-------------|
| Rio de Janeiro – Capital | 3,8 – 5,4 |
| São Paulo – Capital | 3,8 – 4,6 |
| Cubatão – SP | 3,7 – 4,7 |
| Niterói – RJ | 4,3 – 5,3 |
| Amazônia | 4,7 – 5,7 |

Como exemplo de um fenômeno de chuva ácida nas grandes cidades brasileiras, podemos citar os valores de pH da água da chuva no Parque Nacional da Tijuca na cidade do Rio de Janeiro. Na **Figura 3** está representada a relação entre volume de chuva por semana (mm/semana) e o pH. Note a tendência de quanto menor o volume de chuva menor o pH.

Ou seja, os poluentes são injetados na atmosfera, que por ocasião das chuvas são “lavados”. Dependendo do volume de chuva os ácidos que se formam vão constituir uma solução mais concentrada ou mais diluída.

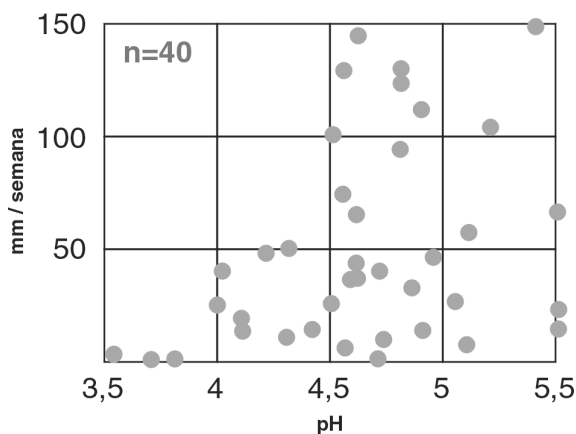


Figura 3: Relação entre volume de chuva e pH no Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro. Fonte: SILVA FILHO, Emmanoel V., OVALLE, Alvaro Ramon C., BROWN, Irving Foster. Precipitação ácida no Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro. *Ciência e Cultura*, São Paulo, v.39, n.4, p.419-422, 1987.

Tema para Discussão: Converse com seus colegas de curso no seu pólo, e discutam se existe chuva ácida na sua região. Como testar esta hipótese?



Atenção: A unidade de medida de volume de chuva é milímetro – mm; ela representa a altura da lâmina da água que se formaria sobre uma superfície de 1m^2 com a quantidade de chuva que caiu nesta superfície. Por exemplo: 1 mm é igual a 1 litro de chuva por m^2 . Assim, se ocorreu uma chuva de 50 mm, significa que choveram cerca de 50 litros de água por 1m^2 de solo.

Quando você considera uma chuva com pH em torno de 4,0 caindo sobre os continentes, chamamos sua atenção para os impactos desta acidez sobre estruturas de calcário (por exemplo, estátuas e edifícios), a vegetação, os cátions trocáveis dos solos (ver Aulas 9 e 10), lagos e rios (afetando peixes, por exemplo). Outro aspecto crítico a ser considerado, é a capacidade de transporte de longa distância da atmosfera (centenas de quilômetros), ou seja, áreas que não têm fonte de poluição podem estar sofrendo as consequências da chuva ácida simplesmente por estarem na direção preferencial dos ventos.



O EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL

Pelos dados da **Figura 1**, podemos constatar que apesar de ser o quarto gás mais abundante na atmosfera, o dióxido de carbono (CO_2) está presente com apenas 0,036% (em volume), ou 360 ppm. Apesar da sua baixa concentração na atmosfera, o dióxido de carbono é importante por duas razões: (1) Ele é uma fonte de carbono para fotossíntese das plantas; e (2) Absorve a radiação infravermelha liberada pela Terra e irradiando-a de volta para a superfície, ajudando a manter a temperatura do planeta – o efeito estufa.

A **Figura 4** ilustra o papel da atmosfera na manutenção da temperatura na superfície terrestre utilizando uma estufa de vidro, ou casa de vegetação, como modelo. A energia solar que alcança a Terra é uma radiação de pequeno comprimento de onda (ondas curtas). Cerca de 30% da radiação solar incidente é refletida de volta para o espaço pelas nuvens e oceanos, mas o restante 70% é absorvido pelos oceanos, atmosfera, continentes e biosfera. Virtualmente toda radiação absorvida vira calor, exceto a utilizada na fotossíntese.

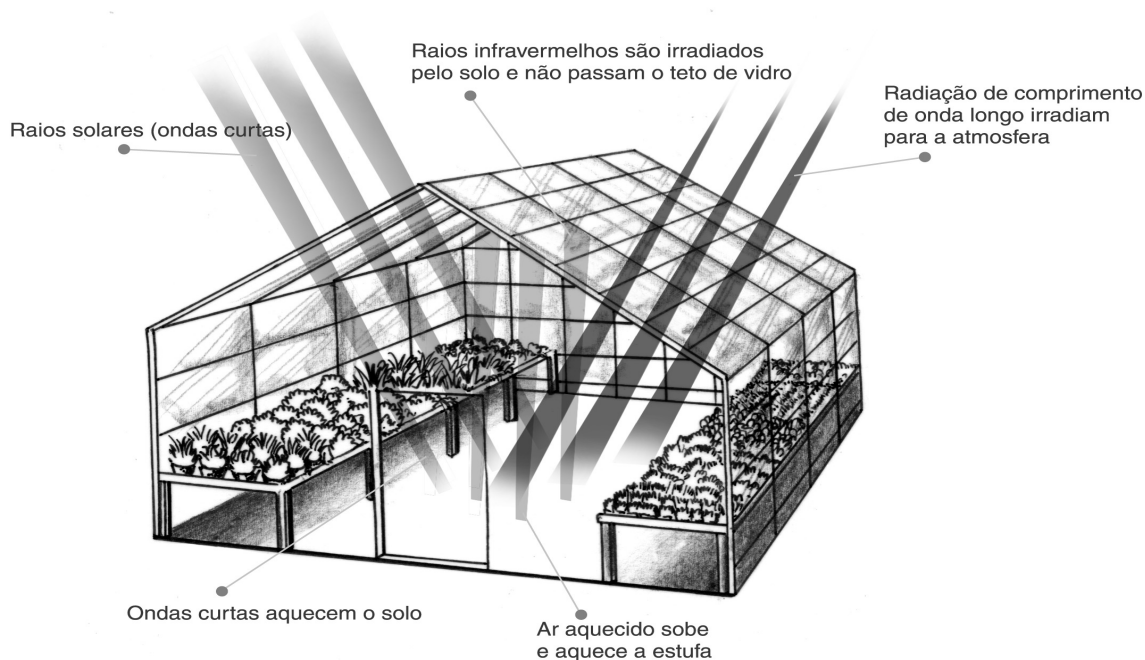


Figura 4: Estufa ou casa de vegetação ilustrando como funciona o efeito estufa. Fonte: modificado de MURCK, B.W.; SKINNER, B.J. *Geology Today: Understanding Our Planet*. John Wiley & Sons Inc, 1999. p. 371

Eventualmente, esta energia é irradiada de volta para o espaço na forma de radiação infravermelha de longo comprimento de onda. Uma parte desta energia é absorvida pelos gases atmosféricos, que como resultado retêm a energia nas partes baixas da atmosfera, causando um aumento na temperatura na superfície do planeta. O princípio que faz funcionar uma casa de vegetação é o mesmo, com o telhado de vidro deixando passar a radiação de ondas curtas do Sol, mas diminuindo a saída da radiação com comprimento de onda mais longo. Sem este mecanismo regulador a superfície da Terra seria um local impróprio para vida.

Este processo natural, que mantém a temperatura amena na superfície da Terra, tem sido afetado pelo aumento das emissões de CO₂ ao longo das últimas décadas. A **Figura 4** ilustra o aumento contínuo da concentração de CO₂ na atmosfera do Havaí (EUA) entre 1958 e 1994, sendo que nos últimos 15 anos o aumento se acentuou. Este aumento do CO₂ atmosférico é atribuído, principalmente, a queima de combustíveis fósseis (carvão e petróleo). Nos últimos 100 anos a taxa de liberação de CO₂ pelos combustíveis fósseis tem aumentado cerca de 2,5% ao ano. Outra fonte que deve ser considerada é o desmatamento, seguido de queimada ou oxidação da matéria orgânica estocada nas plantas, que está concentrado na expansão das áreas agrícolas em países tropicais, como o Brasil.

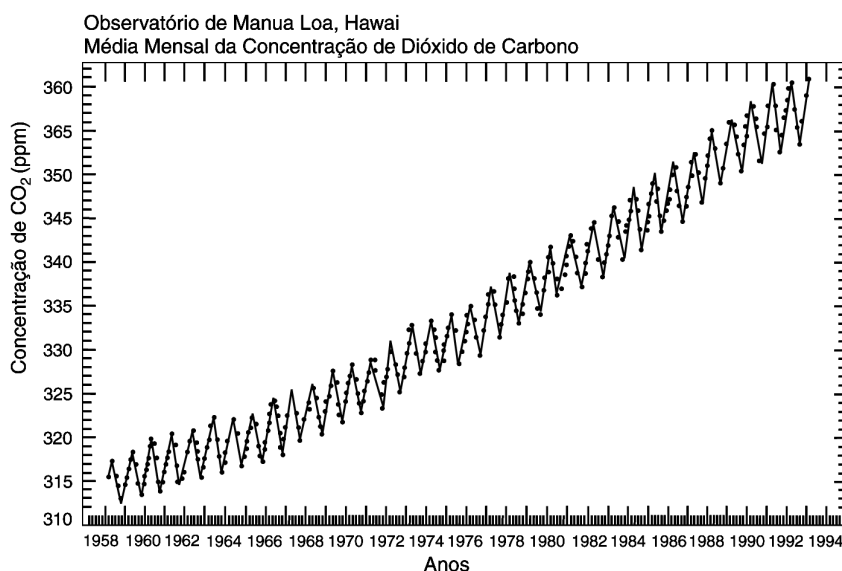


Figura 5: Média mensal de concentração de dióxido de carbono (CO₂) próximo à superfície nas Ilhas do Havaí (EUA) entre 1958 e 1994; ppm – parte por milhão. Fonte: BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. pág. 30.

Além do dióxido de carbono (CO_2) outros gases têm participação no efeito estufa, tais como, o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). O efeito climático do aumento destes gases do efeito estufa na atmosfera é o aquecimento global, uma vez que eles vão acentuar o efeito estufa natural. Em mantendo-se as taxas de emissão atuais destes gases, a concentração de CO_2 atmosférico irá dobrar nos próximos 50 anos, elevando a temperatura média da Terra em até $4,5^\circ\text{C}$. A modelagem que resulta nestas previsões é extremamente complexa, dependendo, por exemplo, da taxa de aumento do consumo de combustíveis fósseis nas próximas décadas.

As conseqüências do aumento de CO_2 , CH_4 e de outros gases estão relacionadas, principalmente, com o balanço de energia da Terra através do efeito estufa. Uma vez que o ciclo hidrológico está intimamente relacionado com o ciclo de energia na superfície da Terra, o aquecimento global pode provocar alterações no ciclo hidrológico. Embora a média de precipitação possa aumentar globalmente, em algumas áreas pode desenvolver-se um clima mais seco. Outra possibilidade, seria a diminuição da quantidade de gelo estocada na Terra, resultando na subida do nível médio dos mares. O efeito a longo prazo sobre a humanidade estaria relacionado ao aumento das regiões áridas (com a conseqüente diminuição na produção de alimentos) e à inundação das áreas costeiras.

RESUMO

Nestas duas aulas vimos que a atmosfera é composta de gases e aerossóis (partículas sólidas e líquidas), e que alguns poucos gases (nitrogênio, oxigênio e argônio) dominam a sua composição. As fontes dos aerossóis podem ser terrestres (naturais ou poluição) e marinhas, sendo que cada fonte tem uma assinatura química característica, e que a proporção entre estas fontes varia com a distância do mar, resultando em chuvas com características químicas diferentes.

A chuva é naturalmente ácida (~ pH 5,7) devido ao equilíbrio entre a água e o CO_2 atmosférico. Porém, fontes antrópicas, tais como, queima de combustíveis fósseis e indústrias, injetam compostos de enxofre e nitrogênio na atmosfera, provocando o fenômeno da chuva ácida, cujos valores de pH podem ser menores que 4. Outra consequência das atividades humanas sobre a química atmosférica é a intensificação do efeito estufa, resultado do acúmulo principalmente de CO_2 na atmosfera originado dos combustíveis fósseis. Este acúmulo afeta o balanço de calor e o ciclo hidrológico ao nível global, provocando desequilíbrio na distribuição das chuvas e elevação do nível do mar.

EXERCÍCIOS

1. Quais os dois grandes grupos de fontes de aerossóis para a atmosfera? Dê um exemplo da “assinatura química” de cada um.
2. Você acredita que exista diferença na composição química das águas pluviais entre Maricá (RJ) e Búzios (RJ)? Justifique.
3. Explique porque as chuvas são naturalmente ácidas.
4. Descreva sucintamente o que você entende sobre efeito estufa.
5. Identifique na sua região atividades humanas que possam estar contribuindo para a chuva ácida e o efeito estufa. Justifique.

PARA VOCÊ REFLETIR

Os fenômenos da chuva ácida e efeito estufa ocorrem naturalmente, ou seja, não apareceram por causa da ação do homem. O que acontece é que os materiais injetados na atmosfera intensificam estes processos, provocando uma reação em cadeia em outros sistemas naturais, por exemplo: a chuva ácida faz com que o alumínio (Al) seja liberado em grandes quantidades do solo para as águas de percolação (normalmente muito pouco alumínio é lixiviado do solo); esta água enriquecida de alumínio dissolvido infiltra até o lençol freático e atinge um rio ou um lago. Ao ser assimilado pelos peixes, este alumínio acumula-se nas brânquias, levando o peixe à morte.

Leitura recomendada

BERNER, Elisabeth K.; BERNER, Robert A. *Global Environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 376p. Cap. 1, 2 e 3.

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p. Cap. 13 e 14.

Sites recomendados

Agência Ambiental dos Estados Unidos

U.S. Environmental Protection Agency. Disponível em: <www.epa.gov/airmarket/acidrain/index.html> Acesso em: 11 set. 2002.

Agência de Meio Ambiente do Governo canadense

THE GREEN Lane. Environment Canada's World Wide Web Site. Disponível em: <www.ec.gc.ca/acidrain> Acesso em: 11 set. 2002.

Efeito estufa

THE AUSTRALIAN Greenhouse Office. Disponível em: <www.greenhouse.gov.au> Acesso em: 11 set. 2002.

Bacia de drenagem e água subterrânea

AULAS

23/24

objetivos

- Avaliar as modificações químicas que ocorrem na água da chuva ao longo do seu percurso através da paisagem continental até o lençol freático.
- Identificar as principais fontes naturais e antrópicas de elementos para o lençol freático.
- Entender os aspectos gerais relacionados ao papel do uso do solo na contaminação do lençol freático.

Pré-requisitos

Antes de continuar reveja nas Aulas 1 e 2 o ciclo hidrológico e os caminhos que a água percorre na superfície da Terra, bem como os conceitos de geosfera, prisma elementar e abundância de elementos nas Aulas 19 e 20.

INTRODUÇÃO

Nas aulas 21 e 22 foram abordados os aspectos relacionados à química atmosférica e composição das águas pluviais. Observamos que existem fontes continentais e marinhas de gases e aerossóis para atmosfera, e que estes interagem com a água da chuva produzindo uma solução diluída cuja composição química apresenta uma variação espacial. Cada fonte de material tem a sua “assinatura química”, seja esta fonte natural ou antropogênica. Estas últimas promovem alterações nos processos naturais induzindo ao fenômeno da chuva ácida e do efeito estufa.

Nas aulas 23 e 24 vamos avaliar as modificações químicas que acontecem quando as águas pluviais atingem os continentes, identificar as principais fontes de materiais, naturais e antropogênicos, para as águas subterrâneas, e conhecer um pouco sobre contaminação de lençol freático.

BACIA DE DRENAGEM UNIDADE BÁSICA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

BACIA DE DRENAGEM

Área de terreno delimitada topograficamente, onde toda a água da chuva que cai migra em direção a um rio ou lago; também chamada bacia hidrográfica.

Toda superfície dos continentes é parte de uma **BACIA DE DRENAGEM**, também chamada **bacia hidrográfica**. Quando a chuva cai a maior parte da água migra em direção a um rio ou lago através do escoamento superficial e sub-superficial, sendo a área drenada chamada bacia de drenagem. Outra forma de definir uma bacia de drenagem é como uma área de terreno limitada topograficamente por serras ou morros, onde toda água da chuva que cai migra em direção a um rio ou lago. As bacias de drenagem podem variar desde um pequeno riacho com uma área de alguns quilômetros quadrados, até uma ampla região drenada por um grande rio e seus tributários com dezenas de milhares de quilômetros quadrados (por exemplo, Rio Paraíba do Sul).

O Brasil pode ser dividido em grandes bacias de drenagem, tais como Bacia Amazônica, Bacia do Rio São Francisco, entre outras. Deve-se notar que estas grandes unidades hidrográficas podem ser subdivididas em unidades menores: na Bacia do Rio Paraíba do Sul estão incluídas as bacias (ou sub-bacias) dos rios Paraíba, Muriaé e Pomba entre outros. E estes, por sua vez, têm nos seus afluentes outras bacias menores.

GESTÃO AMBIENTAL

Conjunto de ações que visam o uso sustentável dos recursos naturais.



Atenção: A importância das bacias de drenagem como unidades de **GESTÃO AMBIENTAL** está materializada na Lei nº 9.433 de 8 de Janeiro de 1997, que estabelece a Política Nacional dos Recursos Hídricos, onde no Capítulo 1, Artigo 1º, inciso V reconhece que “a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional dos Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos”.

Para entender melhor o conceito de bacia de drenagem vamos observar a **Figura 1**. Nela está representada de maneira simples a forma básica de uma bacia de drenagem, com seus **DIVISORES DE ÁGUA** formados pelos morros e serras e o rio na parte mais baixa. Porém, já sabemos que estas paisagens não são somente em forma de “bacia” e o rio correndo no fundo do vale. Existe uma estrutura na paisagem, cujos componentes representam as geosferas. Assim, podemos começar a detalhar a nossa bacia de drenagem separando a litosfera da pedosfera (**Figura 2**). A seguir separamos a zona saturada, na porção inferior do solo próxima ao embasamento rochoso, da zona não-saturada na parte superior do solo. Esta zona saturada constitui o lençol freático, que não permanece estático na paisagem.

Afinal ele abastece o rio quando não está chovendo através de um fluxo lateral ao longo das encostas em direção ao canal fluvial. Observe que quando a zona saturada aflora na superfície do terreno no fundo do vale ela forma o rio, ou seja, o rio é um afloramento do lençol freático, assim como são as lagoas e os brejos.

Para completar a estruturação da bacia de drenagem, podemos agora acrescentar a biosfera, bem como formas variadas de uso do solo que podem ocorrer em uma bacia de drenagem: agricultura, pecuária, indústria ou urbanização (**Figura 3**). Nesta figura também observamos as **ÁREAS DE RECARGA** do lençol freático ao longo das encostas, ou seja, a superfície da bacia de drenagem recebe a chuva que ao infiltrar-se no solo recarrega o lençol freático.

DIVISORES DE ÁGUA

É toda elevação topográfica, seja de poucos metros ou centenas de metros, que separa dois rios, onde a chuva que cai escoar para um lado ou para outro da encosta; são os limites das bacias de drenagem.

ÁREAS DE RECARGA

São áreas das bacias de drenagem onde a água da chuva infiltra o solo até a zona saturada, abastecendo o lençol freático.

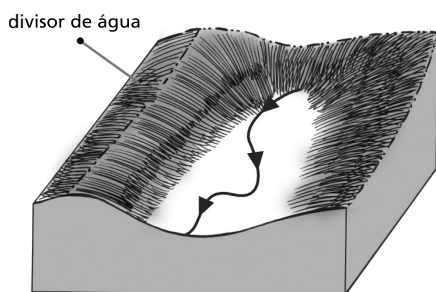


Figura 1: Representação simplificada de uma bacia de drenagem.

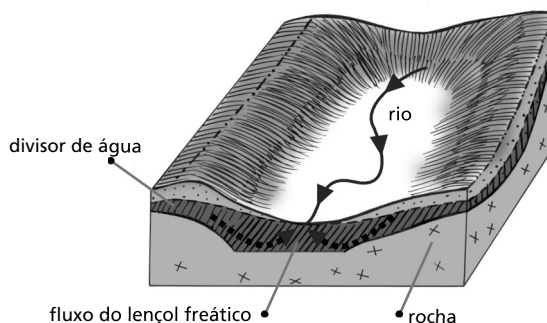


Figura 2: Representação de uma bacia de drenagem, detalhando litosfera, solo e lençol freático, bem como a direção preferencial dos fluxos sub-superficiais.

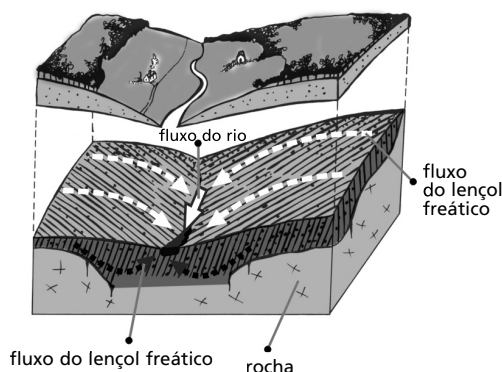


Figura 3: Representação de uma bacia de drenagem com detalhamento dos principais componentes da paisagem, bem como dos fluxos superficiais e sub-superficiais. Na parte superior temos a zona não-saturada do solo e seus diferentes usos, e na parte inferior a zona saturada do solo com o embasamento rochoso. Fonte: Massachusetts Audubon Society. *Groundwater and Contamination from the Watershed into the Well*. Lincoln: Community Groundwater Protection Project/Massachusetts Audubon Society, Jan./Feb, 1984. (Groundwater Information Flyer, 2)

Uso MÚLTIPLO

É um termo utilizado para exprimir a necessidade de compatibilizar os diferentes usos dos recursos hídricos.



Atenção: A utilização das bacias de drenagem como unidades de gestão de recursos hídricos está baseada no fato de que elas representam a forma básica na qual a hidrosfera se organiza nos continentes. A gestão das águas visa garantir o uso MÚLTIPLO deste recurso, por exemplo: em uma bacia de drenagem a utilização da água de um rio para irrigação não pode comprometer o abastecimento urbano. Outro objetivo da gestão dos recursos hídricos é garantir a disponibilidade de água de qualidade para as gerações futuras.



Lembre-se: Os oceanos representam cerca de 95% de toda água do planeta, enquanto as geleiras guardam em torno de 3%. Apesar da aparente abundância de água nos oceanos, ela não é própria para consumo humano, nem para agricultura ou pecuária. As necessidades de água das populações humanas devem ser supridas por menos de 2% da água disponível nos continentes, que são a água subterrânea, rios e lagos, sendo que a água subterrânea é, de longe, o maior reservatório de água doce dos continentes.

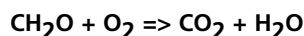
LENÇOL FREÁTICO – A HIDROSFERA SUBTERRÂNEA

ÁGUA SUBTERRÂNEA

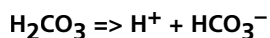
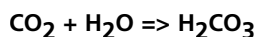
É a massa de água estocada em sub-superfície abaixo da zona não-saturada do solo; também chamada Lençol Freático.

Dentre os reservatórios mais importantes de água nos continentes está o lençol freático, também chamado **ÁGUA SUBTERRÂNEA**. A sua composição química está relacionada com o percurso que a água faz desde a atmosfera até a zona saturada do solo próximo ao contato solo-rocha. Para tanto, vamos rever a figura do prisma elementar de um ecossistema florestal (Figura 2, aulas 19 e 20). Está claro para nós que a água da chuva, ao atingir a superfície dos continentes, tem sua composição química alterada pela interação com os componentes da paisagem.

A água da chuva, ao atravessar a biosfera e alcançar o solo, tem sua composição alterada através da interação com plantas e microorganismos do solo. A serrapilheira acumulada no chão da floresta passa por um processo de decomposição microbiana (oxidação) segundo a reação geral que se segue:

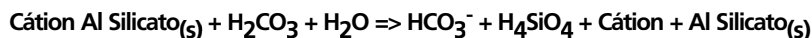


Esta reação tem uma série de produtos, tais como ácidos inorgânicos e orgânicos, além de nutrientes (por exemplo, C, N, P dentre outros, não representados nesta equação geral), que são incorporados à água de infiltração. Dentre os ácidos podemos citar o ácido carbônico (H_2CO_3) que é formado pela reação do CO_2 produzido pela decomposição da matéria orgânica com a água. Este ácido se dissocia parcialmente liberando H^+ :



É esta água da chuva, com uma acidez aumentada e enriquecida em nutrientes pela interação com a serrapilheira, que infiltra o solo. Uma vez no solo, uma parte dos nutrientes dissolvidos é absorvido pelas raízes das plantas, e na medida que a água percola lentamente através do solo ela interage com os argilominerais. A forma de interação acontece através da capacidade de troca catiônica dos argilominerais, podendo ser mais ou menos intensa dependendo do tipo de argilomineral (releia esta parte da matéria nas Aulas 9 e 10). Esta interação pode resultar numa adsorção ou lixiviação de nutrientes nos argilominerais, dependendo do tipo de argilomineral e da composição química da água de percolação.

Quando atinge o lençol freático próximo ao contato solo-rocha a água vai participar do processo de intemperismo dos minerais primários presentes nas rochas (o processo de intemperismo foi objeto das Aulas 9 e 10, as quais você deve rever). Este processo segue a reação genérica abaixo:



Através desta reação uma série de elementos e compostos são incorporados ao lençol freático.

Desta forma, observamos que a composição química do lençol freático é reflexo das interações que a água de chuva desenvolve com os componentes da paisagem na medida em que atravessa o prisma elementar. Além da própria composição química da chuva, os elementos dissolvidos no lençol freático vão ser fruto do tipo de argilomineral, do tipo de rocha, da atividade biológica e também do uso do solo. A atividade biológica vai ser função do tipo de cobertura vegetal presente, ou seja, uma floresta tropical apresenta uma atividade biológica mais acentuada do que uma vegetação de restinga, onde a produtividade primária é bem menor.

FONTES DE ELEMENTOS PARA O LENÇOL FREÁTICO CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Quando estudamos as características químicas das águas pluviais, vimos que cada fonte tem sua “assinatura química” (**Figura 2**, Aulas 21 e 22), sendo que um elemento dissolvido na água da chuva pode ter mais de uma fonte. Agora, ao avaliar as fontes de elementos dissolvidos para o lençol freático, temos, novamente, de nos reportar ao conceito de abundância de elementos nas geosferas (Aulas 3 e 4). Esta associação de elementos em cada fonte é a mesma que vai influenciar o lençol freático, ou seja, a interação com a biosfera vai incorporar carbono, nitrogênio, cálcio, dentre outros, às águas de percolação, enquanto o intemperismo de minerais primários tende a liberar silício e alcalinidade.

Uma vez que já entendemos o conceito de associação de elementos ou “assinatura química” das fontes, vamos mudar a forma de abordar a composição química do lençol freático. Observe, na **Tabela 1**, que para um determinado elemento estão listadas suas diferentes fontes naturais, seguindo o caminho que a água percorreria através do prisma até atingir o lençol freático. Assim, se observarmos as fontes de Ca^{2+} (cálcio) para o lençol freático, veremos que a chuva já tem dissolvida uma quantidade deste elemento, que pode ser aumentada pela lavagem da vegetação (serrapilheira) antes de infiltrar o solo. Dentro dos solos as reações de intemperismo também podem contribuir com cálcio para o lençol freático, dependendo da composição química do substrato rochoso.

Tabela 1: Principais fontes naturais de elementos para o lençol freático.

| Elemento ou Composto | Principais Fontes |
|---|---------------------------------|
| Na^+ | Chuva e Intemperismo |
| K^+ | Chuva , Biosfera e Intemperismo |
| Mg^{2+} | Chuva, Biosfera e Intemperismo |
| Ca^{2+} | Chuva , Biosfera e Intemperismo |
| SO_4^{2-} e Cl^- | Chuva |
| H_4SiO_4 e HCO_3^- | Intemperismo |
| NO_3^- e NH_4^+ | Chuva e Biosfera |
| PO_4^{3-} | Biosfera e Intemperismo |

As fontes antrópicas de elementos para o lençol freático estão associadas a mudanças no uso do solo, principalmente através da urbanização, das atividades agropecuárias e industriais. O principal impacto da urbanização no lençol freático se dá através do esgoto doméstico (**FOSSAS SÉPTICAS** e **sumidouros**) e **aterros sanitários**. Os esgotos domésticos, além da contaminação bacteriológica (**coliformes fecais e totais**), introduzem nas águas de lençol freático compostos de nitrogênio e fósforo que, dependendo da quantidade, podem tornar a água imprópria para consumo humano sem tratamento prévio.



Atenção: Quando furamos um poço para abastecimento de água em uma residência, sua localização deve ser rigorosamente escolhida, pois como a grande maioria dos esgotos domésticos são tratados com fossas sépticas, a proximidade entre os dois pode levar a contaminação da água do poço por esgoto. Aterros sanitários ou depósitos de lixo também são uma fonte de poluentes para o lençol freático. Na **Figura 4** vemos um exemplo de como um aterro sanitário, ainda que distante da área residencial, pode contaminar poços artesianos localizados a jusante (abaixo em uma encosta).

FOSSAS SÉPTICAS

São tanques de sedimentação cavados no solo nos quais os resíduos sólidos de esgotos residenciais são decompostos por bactérias; na medida que a água do esgoto sai da fossa ela infiltra o solo onde é parcialmente filtrada - sumidouro.

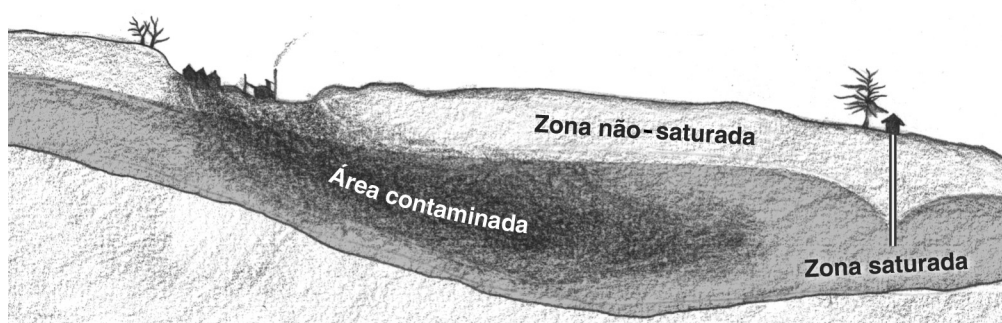


Figura 4: Vista lateral de uma encosta com um lixão na parte superior (montante) e residências com poço para abastecimento de água na parte inferior (jusante). Observe a área contaminada do lençol freático estendendo-se até a captação de água das residências. Fonte: Massachusetts Audubon Society. *Groundwater and Contamination from the Watershed into the Well*. Lincoln: Community Groundwater Protection Project/Massachusetts Audubon Society, Jan./Feb, 1984. (Groundwater Information Flyer, 2)

As práticas agrícolas de manejo de plantações incluem desde a calagem do solo (correção do pH do solo com uso de calcário) até fertilização. A calagem pode liberar para água de lençol freático carbonatos (CO_3^{-2}), bicarbonatos (HCO_3^-), assim como cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}), pois o calcário nada mais é do que um produto originado de uma rocha sedimentar carbonática (veja Aulas 7 e 8). Cálcio e magnésio em excesso nas águas consumidas pela população podem provocar cálculos renais (“pedra nos rins”). A fertilização, como visto em aulas anteriores, libera na paisagem compostos de nitrogênio (NO_3^- , NH_4^+), fósforo (PO_4^{-3}) e potássio (K^+). Um dos maiores impactos da fertilização é a **nitrificação do lençol freático**, ou seja, contaminação por nitrato (NO_3^-), que pode provocar doenças na população que se abastece desta água. Da mesma forma, a presença de um aterro sanitário ou “lixão”, provoca, através da infiltração do **CHORUME**, a contaminação do lençol freático com compostos diversos, entre eles metais pesados e uma série de produtos químicos nocivos à saúde.

CHORUME

É o termo utilizado para se referir ao líquido escuro e turvo proveniente do armazenamento do lixo em aterros sanitários.

As indústrias podem gerar uma grande variedade de efluentes, dependendo do tipo de planta industrial. Podemos citar efluentes ácidos originados de mineração de carvão com presença de sulfetos de ferro (FeS_2 , pirita), onde a oxidação da pilha de rejeitos produz ácido sulfúrico (H_2SO_4) que contamina não só o lençol freático, mas também as águas superficiais como rios e lagos. Um exemplo deste tipo de atividade está localizada em Criciúma (SC).

RESUMO

Nestas duas aulas vimos a importância da bacia de drenagem como forma básica na qual a hidrosfera se organiza nos continentes, sendo inclusive a unidade de gestão de recursos hídricos. A composição química do lençol freático está relacionada com o percurso que a água da chuva faz através da paisagem até a zona saturada do solo. Da mesma forma que para a água da chuva, as fontes de elementos dissolvidos para o lençol freático apresentam uma associação de elementos característica, sejam estas fontes naturais ou antropogênicas. Observamos também como a água do lençol freático pode ser contaminada pelos diferentes usos do solo.

EXERCÍCIOS AVALIATIVOS

1. Defina com suas palavras o que é uma bacia de drenagem.
2. Qual a relação hidrológica que existe entre o lençol freático e o rio em uma bacia de drenagem?
3. Como o tipo de rocha pode afetar a composição química do lençol freático? Cite um exemplo.
4. A composição química do lençol freático de uma área costeira (p.ex. Angra dos Reis, RJ) e de uma região do interior do estado (p.ex. Nova Friburgo) podem apresentar diferenças entre si? Justifique.
5. Com base no que você aprendeu nestas aulas, cite um exemplo da sua região, no qual a mudança do uso do solo pode ter ocasionado a contaminação do lençol freático. Justifique.
6. Você acredita que na sua residência possam existir fontes de contaminação para o lençol freático? Justifique.

Leitura recomendada

BERNER, Elisabeth K.; BERNER, Robert A. *Global Environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. Cap. 4.

PRESS, Frank; SIEVER, Raymond. *Understanding earth*. New York: W.H. Freeman and Company, 2000. Cap. 12.

Sites recomendados

Legislação Ambiental Federal

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 12 set. 2002.

Legislação sobre crimes ambientais.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. IBAMA On Line. Disponível em: <www.ibama.gov.br>. Acesso em: 11 set. 2002.

Rios e lagos
Processos físicos,
químicos e
biológicos

AULAS

25/26

objetivos

- Reconhecer os materiais particulados e dissolvidos transportados pelos rios.
- Identificar as principais fontes de elementos para as águas fluviais.
- Entender como a composição química das águas fluviais varia ao longo do tempo.
- Relacionar as etapas do metabolismo de um ecossistema lagunar.

Pré-requisitos

Você deve rever as aulas 19 a 24 enfocando a abundância dos elementos nas geosferas, chuva, lençol freático e bacia de drenagem.

ÁGUAS SUPERFICIAIS

Parte da hidrosfera continental representada pelos ecossistemas aquáticos, tais como lagos, brejos e rios; têm origem no afloramento do lençol freático.

Após considerarmos a composição química das chuvas e sua relação com gases e partículas presentes na atmosfera, focamos nossa atenção nos caminhos que a água da chuva percorre após se precipitar na superfície dos continentes. Observamos que a bacia de drenagem é a forma na qual a hidrosfera se organiza nos continentes, sendo que o lençol freático é o principal reservatório de água doce disponível para as populações humanas. A importância da interação da água da chuva com os diferentes componentes da paisagem no seu caminho até o lençol freático foi ressaltada na definição da composição química deste recurso hídrico.

Quando o nível do lençol freático (zona saturada do solo) coincide com a superfície do terreno nas partes baixas das bacias de drenagem (veja **Figura 2** das aulas 23 e 24), formam-se o que se costuma chamar de **ÁGUAS SUPERFICIAIS**, ou seja, rios, lagos e áreas alagáveis (brejos). O foco destas aulas é apresentar as principais características ambientais dos ecossistemas fluviais e lacustres.

OS RIOS – AGENTES TRANSPORTADORES DE MASSA

Os rios são a principal via pela qual os produtos particulados e dissolvidos, resultado dos processos naturais e antrópicos que ocorrem na superfície dos continentes, alcançam os oceanos. Dentro do ciclo hidrológico, as águas fluviais são originadas das chuvas, que têm uma parte evaporada de volta para a atmosfera, enquanto o restante pode infiltrar no solo para formar o lençol freático. A **Figura 4** das aulas 1 e 2 sumariza os percursos que a água utiliza para se mover na superfície dos continentes.

Os rios têm desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento humano. Historicamente, os assentamentos ao longo dos rios são favorecidos pela disponibilidade de água para abastecimento e pela facilidade de transporte. Como resultado da proximidade entre as atividades humanas e as águas fluviais, temos o lançamento de vários tipos de efluentes nos canais fluviais, bem como o impacto indireto das atividades agropecuárias (por exemplo, pesticidas e fertilizantes), afetando a qualidade do recurso hídrico. A correta utilização deste recurso, bem como a remediação de áreas já poluídas, passa pelo entendimento dos principais processos responsáveis pelas características químicas das águas fluviais.

Assim, da mesma forma que para o lençol freático, é importante visualizar o caminho que a água da chuva percorre dentro da bacia de drenagem até chegar ao canal fluvial, identificando as principais interações entre ela e os componentes da paisagem. Para isso podemos utilizar o conceito de **prisma elementar**. A **Figura 2** das aulas 19 e 20 apresenta um prisma elementar de uma floresta com as principais entradas e saídas de água do sistema. Se considerarmos que este prisma representa a porção terrestre de uma bacia de drenagem, a saída de água através do **afloramento do lençol freático** será, na realidade, a fonte dominante da água presente dentro do canal fluvial (as outras fontes de água para o canal fluvial seriam o escoamento superficial e subsuperficial, além da chuva direta no canal). Com este cenário em mente, podemos entender que tipo de materiais um rio transporta e quais as suas fontes.

FRAÇÃO PARTICULADA

Parte do material presente nos ecossistemas aquáticos na forma de partículas.

OS MATERIAIS QUE OS RIOS TRANSPORTAM

Numa primeira abordagem, podemos separar os materiais transportados em dois tipos: **particulados** e **dissolvidos**. Esta separação é feita através da passagem da água do rio por um filtro de papel de tamanho de poro definido, ou seja: pega-se uma amostra da água do rio (da ordem de 1 litro), e faz-se uma filtração utilizando um filtro de 0,45 μm de diâmetro de poro (1 μm é igual a 10^{-6} cm). O que fica retido no filtro de papel é considerado particulado (ou **FRAÇÃO PARTICULADA**), e o que passa é chamado dissolvido (**FRAÇÃO DISSOLVIDA**; **Figura 1**).

FRAÇÃO DISSOLVIDA

Parte do material presente em solução nos ecossistemas aquáticos.

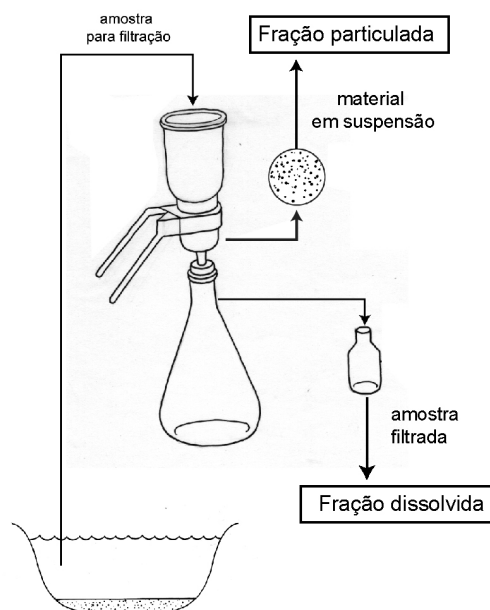


Figura 1: Processo de filtração de uma amostra de água utilizado para separação da fração dissolvida da fração particulada. Fonte: modificada de ESTEVES, F.A. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. p. 225.



Atenção: Um processo análogo acontece no filtro d'água que utilizamos em nossas residências. Antes de bebermos a água, ela é colocada na parte superior de um filtro de barro (ou cerâmica). Nesta parte do filtro, temos o que conhecemos como "vela", uma peça de cerâmica porosa por onde a água passa antes de ir para a parte inferior do filtro. Durante esta passagem, a maior parte das partículas presentes na água é retida na "vela", com a água filtrada se acumulando na parte inferior do filtro de barro (ou cerâmica).

Quando analisamos mais detalhadamente o material transportado pelos rios, vemos que, além da água, outros componentes estão presentes:

1. Material particulado em suspensão inorgânico: os elementos maiores que compõem estas partículas são Al, Fe, Si, Ca, K, Mg e Na – em sua maioria argilominerais.
2. Material particulado em suspensão orgânico: elementos mais abundantes nestas partículas são C, N e P – fitoplâncton, zooplâncton e restos de material orgânico.
3. Elementos e compostos maiores dissolvidos: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- e H_4SiO_4 . Estes podem ainda ser divididos em:
 - 3.a. elementos sem fase gasosa na atmosfera:
 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , H_4SiO_4
 - 3.b. elementos com fase gasosa na atmosfera: SO_4^{2-} e HCO_3^- – têm como fontes gases atmosféricos (SO_2 e CO_2 , respectivamente) além do intemperismo de rochas.
4. Nutrientes dissolvidos – N e P – apresentam-se em baixas concentrações nas águas fluviais, sendo também chamados elementos menores dissolvidos.
5. Metais pesados particulados e dissolvidos – Zn e Cu, por exemplo.

PRINCIPAIS FONTES DE ELEMENTOS DISSOLVIDOS PARA OS RIOS

Para entendermos de onde vêm os elementos dissolvidos nas águas fluviais, temos que novamente nos reportar ao **prisma elementar** de um ecossistema florestal (**Figura 2** das aulas 19 e 20). É fundamental que você visualize como a água entra no prisma, o caminho que ela percorre através dos componentes da paisagem, bem como o seu destino quando temos o **afloramento do lençol freático**.

Desta forma, fica claro que a primeira fonte de elementos para as águas fluviais é a **chuva**. Como vimos nas aulas 21 e 22, as chuvas têm uma componente marinha e outra continental na sua composição química. Dentre os elementos dissolvidos mais abundantes (ou elementos maiores dissolvidos) nas águas pluviais temos o cloreto (Cl^-), o sódio (Na^+), o sulfato (SO_4^-) e o magnésio (Mg^{2+}). Assim sendo, podemos observar que uma parte do sódio, sulfato e magnésio dissolvidos presentes nas águas fluviais tem sua origem nas chuvas que caem na bacia de drenagem.

Olhando novamente para o prisma elementar, observamos que ao longo do percurso da água da chuva até o canal fluvial a próxima fonte de elementos está associada à **cobertura vegetal**, ou, de uma forma mais abrangente, ao **uso do solo**. Já sabemos, através da abundância relativa dos elementos nas diferentes geosferas (ver **Tabela 4** das aulas 3 e 4), que elementos como carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e cálcio (Ca), dentre outros, são abundantes na biosfera e em parte, transportados para o canal fluvial. Assim, uma parte dos elementos acima presentes em solução nas águas fluviais é originada da cobertura vegetal que existe na bacia de drenagem.

Os dois últimos componentes da paisagem que podem atuar como fontes de elementos para as águas fluviais são os **solos** e as **rochas**. A água da chuva, após interagir com a vegetação, infiltra no solo até próximo o contato solo-rocha, onde encontra-se o lençol freático. Através do intemperismo da litosfera e da pedosfera (ver aulas 9 e 10), produtos solúveis são incorporados para as águas de infiltração, tais como sílica (H_4SiO_4), alcalinidade (HCO_3^-), sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}). Estes produtos são então transportados para o canal fluvial. Outra fonte de elementos dissolvidos para as águas de infiltração, e em última análise para as águas fluviais, é a capacidade de troca catiônica dos argilominerais. Esta propriedade dos argilominerais, discutida nas aulas 9 e 10, está diretamente relacionada com a estrutura cristalina desses minerais, que liberam elementos como cálcio, magnésio, potássio e sódio para as águas de infiltração.



Atenção: Repasse nas aulas 23 e 24 as fontes de elementos para o lençol freático e observe a semelhança com as fontes para os rios; a semelhança é devida à ligação que existe entre o lençol freático de uma bacia de drenagem e as águas presentes no canal fluvial.

FONTES ANTRÓPICAS

Fontes de materiais para os ecossistemas aquáticos originadas das atividades humanas.

Somadas a estes processos naturais temos as **FONTES ANTRÓPICAS** que também contribuem com elementos dissolvidos para os rios. Estas fontes estão geralmente associadas a **mudanças no uso do solo das bacias de drenagem, tais como agricultura, urbanização e indústrias**. As práticas agrícolas através do uso de fertilizantes, por exemplo, podem contribuir com nitrogênio, fósforo e potássio (N, P e K) para águas fluviais. A urbanização exerce vários impactos sobre as águas fluviais, sendo um dos mais críticos o lançamento de esgotos domésticos “in natura” nos canais fluviais. Esta prática comum na grande maioria dos municípios brasileiros, além dos conhecidos coliformes fecais, contribui com elementos associados com a matéria orgânica (carbono, nitrogênio e fósforo) e o sal de cozinha (NaCl).



Para Reflexão: Os materiais particulados e dissolvidos que os rios transportam refletem as condições de sua bacia de drenagem. Se analisarmos quimicamente a água de um rio podemos inferir sobre os principais processos atuantes em sua bacia de drenagem, sejam eles naturais ou antrópicos. Neste contexto, os canais fluviais podem ser vistos como as veias dos continentes, da mesma forma que as águas fluviais contidas nestes canais podem ser consideradas o sangue das paisagens. Uma paisagem sadia (natural) apresenta seus rios com águas limpas e passível de ser utilizada para vários fins, desde lazer até abastecimento humano, este último com um tratamento prévio simplificado. Da mesma forma uma bacia de drenagem impactada por atividades humanas sem planejamento adequado (lixo, esgoto e efluentes industriais, por exemplo) apresenta suas águas impróprias para a maioria dos usos sem um tratamento adequado.

O conjunto de fontes de elementos dissolvidos para as águas fluviais descrito anteriormente dá origem a uma faixa de concentração de elementos típica das assim chamadas “águas doces” (**Tabela 1**). Se você comparar os valores desta tabela com os apresentados na **Tabela 1** das aulas 21 e 22, onde temos as faixas observadas em águas de chuva, nota-se claramente que ao longo do seu trajeto na paisagem até o canal fluvial, a água da chuva tem seu conteúdo iônico elevado pelas fontes listadas anteriormente. Como exemplo podemos citar o potássio (K^+), que em média tem sua concentração multiplicada por 2 nas águas fluviais em relação à água de chuva.

Tabela 1: Faixa de concentração de elementos dissolvidos nas águas fluviais no rio Paraíba do Sul (Silva, 2000), rio Amazonas, média mundial e média dos rios tropicais.

| | Rio Paraíba do Sul ¹ | Rio Amazonas ² | Média Mundial ² | Média de Rios Tropicais ² |
|--|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Na ⁺ (mg/l) | 5,3 | 1,5 | 5,3 | 4,9 |
| K ⁺ (mg/l) | 1,9 | 0,8 | 1,5 | 1,7 |
| Ca ²⁺ (mg/l) | 3,4 | 5,2 | 13 | 8,2 |
| Mg ²⁺ (mg/l) | 1,2 | 1,0 | 3,1 | 3,5 |
| SO ₄ ⁻ (mg/l) | 2,8 | --- | 1,6 | 4,0 |
| Cl ⁻ (mg/l) | 6,6 | 1,1 | 6,0 | 4,2 |
| H ₄ SiO ₄ (mg/l) | 14 | 7,2 | 11 | 11 |
| HCO ₃ ⁻ (mg/l) | 20 | 20 | 52 | 45 |
| COD (mg/l) | 3,1 | --- | 4,2 | --- |
| NO ₃ ⁻ (μM) | 46 | --- | 7,1 | --- |
| NH ₄ ⁺ (μM) | 1,8 | --- | 1,1 | --- |
| NOD (μM) | 15 | --- | 19 | --- |
| PO ₄ ³⁻ (μM) | 0,7 | 0,1 | 0,3 | --- |
| POD (μM) | 0,3 | --- | --- | --- |

¹SILVA, C.F. *Hidrogeoquímica Fluvial da Bacia Inferior do Rio Paraíba do Sul*. 2000. Dissertação (Mestrado) – Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro. 2000.

²BERNER, E.K.; BERNER, R.A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. pág. 188-192

Neste ponto a questão que surge é se a composição química dos rios se mantém a mesma ao longo do tempo. Para responder a esta pergunta devemos rever a **Figura 4** das aulas 1 e 2, onde observamos os diferentes caminhos que a água da chuva percorre na superfície dos continentes até o canal fluvial. Quando não está chovendo, o canal fluvial é abastecido pelo lençol freático da sua bacia de drenagem. Como os outros fluxos (escoamento superficial e subsuperficial, por exemplo) só aparecem durante chuvas, podemos imaginar que a composição química das águas fluviais se modifique durante uma chuvarada. De fato, se observarmos a **Figura 2**, veremos que ao longo de uma chuvarada a composição química de um riacho varia significativamente. Como exemplo podemos citar a sílica (H₄SiO₄), cuja fonte natural é o intemperismo de solos e rochas, tendo no aporte de água do lençol freático o principal mecanismo hidrológico que fornece sílica dissolvida para as águas fluviais. Quando a chuva começa, ao aporte do lençol freático somam-se os outros fluxos que, refletindo os compartimentos atravessados (dossel, serrapilheira e a porção superior do solo), apresentam baixo conteúdo de sílica dissolvida.

Sendo assim, quando esta água alcança o canal fluvial, a vazão do rio aumenta e a concentração de sílica diminui.

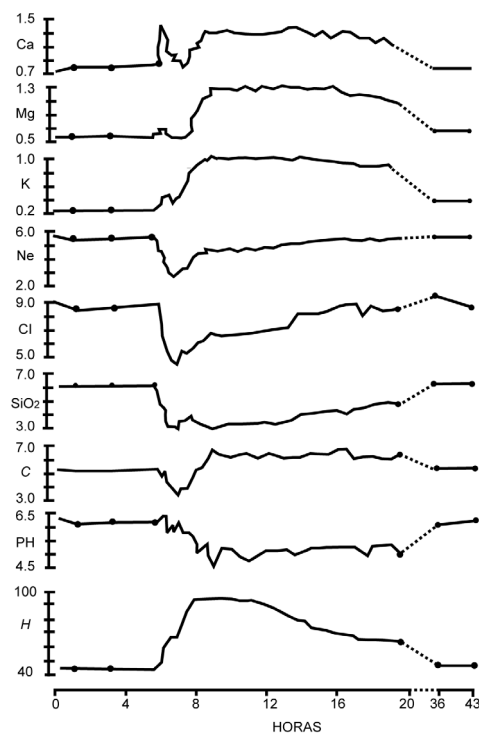


Figura 2: Variação da composição química do rio Cachoeira durante uma chuva, Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro; H – profundidade do rio em centímetros; C – condutividade elétrica em $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$; outros elementos em $\text{mg}.\text{L}^{-1}$. Fonte: MOLDAN, B.; CERNY, J. *Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research*. New York: John Wiley & Sons, 1994. p. 351.

Continuando no mesmo raciocínio, nós sabemos que, na nossa região, a distribuição das chuvas não é homogênea ao longo do ano. Os meses de verão são mais chuvosos, enquanto no inverno o volume de chuva diminui consideravelmente. Assim podemos supor que a composição dos rios varie também ao longo do ano, de acordo com o volume de chuva. Na **Figura 3** podemos observar a variação da composição química das águas do rio Paraíba do Sul ao longo de 3 anos, no município de Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro. Nessa figura observamos que com o aumento da vazão do rio durante o verão, aumenta também o conteúdo de nitrato (NO_3^-) e fosfato (PO_4^{3-}). Como sabemos, nitrogênio e fósforo são elementos abundantes na biosfera (veja Tabela 4 nas aulas 3 e 4), que através da interação com a água da chuva libera os compostos acima para o escoamento superficial e subsuperficial, alcançando o canal fluvial. A biosfera na bacia do Paraíba

do Sul é composta por fragmentos de Mata Atlântica, plantações e pastagens, enquanto freqüentemente temos dentro do canal fluvial e nas suas margens áreas alagáveis que durante a cheia do rio permitem o crescimento de plantas aquáticas. Quando a vazão do rio diminui com o período seco, estas áreas tornam-se secas, e as plantas aquáticas morrem, sendo que seus restos se acumulam sobre os sedimentos. Com o novo período de chuvas, estas áreas são inundadas, liberando os nutrientes acumulados nos detritos vegetais para as águas fluviais.

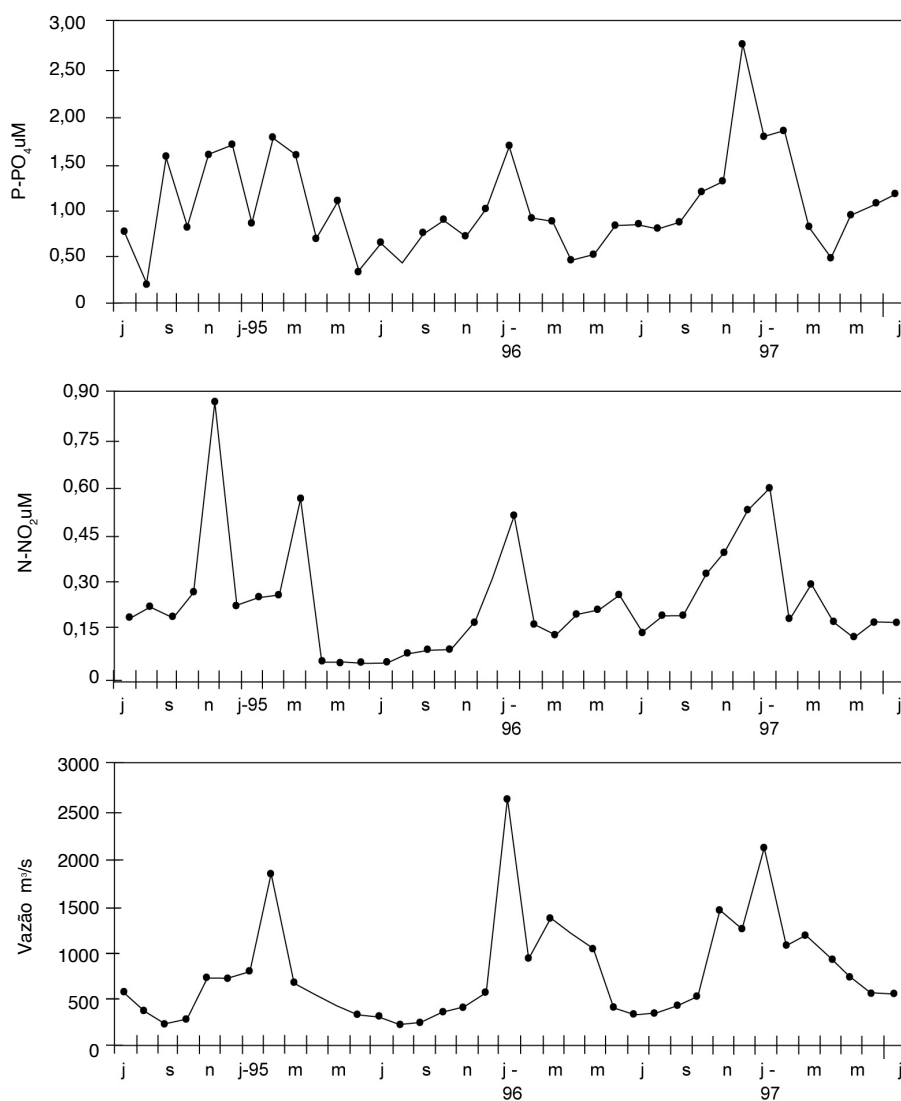


Figura 3: Variação temporal de PO_4^{3-} (fosfato), NO_2^- (nitrito) e vazão na saída da bacia do rio Paraíba do Sul, Campos dos Goytacazes, RJ; período de junho de 1994 até julho de 1997; dados cedidos por Ovalle, A.R.C.

O MATERIAL PARTICULADO TRANSPORTADO EM SUSPENSÃO PELOS RIOS

Como visto anteriormente, o material particulado presente nas águas fluviais pode ser inorgânico e orgânico. A origem deste material pode estar associada à erosão dos solos da bacia de drenagem, desmoronamento das margens após a retirada da mata ciliar, ressuspensão do sedimento de fundo do rio, e pode também ser produzido pelos organismos (macrófitas aquáticas, fitoplâncton, zooplâncton e peixes) dentro do canal fluvial.

Quando tratamos do material dissolvido presente nos rios, o tamanho da bacia de drenagem é importante para definir a quantidade de materiais que alcançam os oceanos, pois o volume de água que um rio despeja no mar é função direta do volume de chuva captado pela bacia de drenagem; ou seja, tamanho é fundamental. Porém esta colocação não é válida quando nos referimos ao material particulado que os rios transportam para o mar. Na **Figura 4** podemos observar que os grandes rios mundiais, tais como Amazonas e Brahmaputra (na Índia), despejam nos oceanos uma quantidade de material particulado menor do que os rios originados de grandes ilhas nos Oceanos Pacífico e Índico, tais como Nova Guiné e Nova Zelândia.

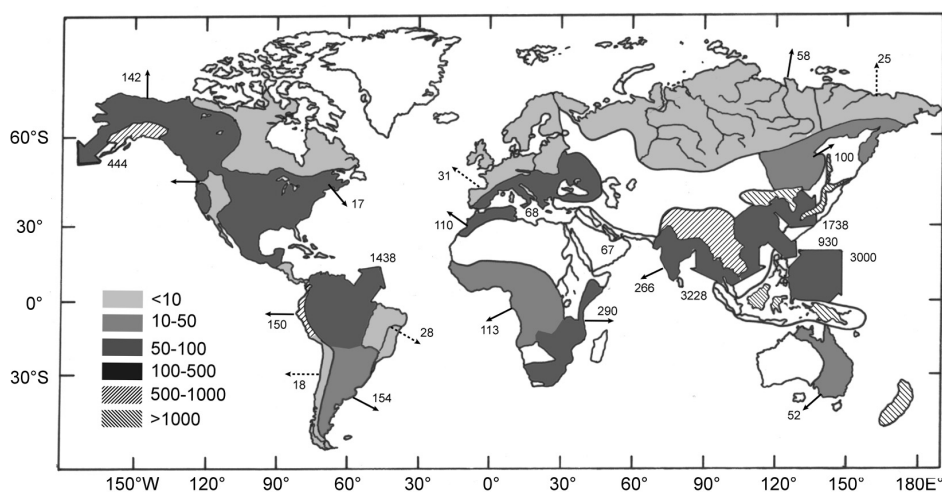


Figura 4: Carga de material particulado em suspensão de diferentes rios mundiais para os oceanos; dados em ton/km²/ano. Fonte: BERNER, E.K.; BERNER, R. A. *Global environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p. 177.

Estes rios drenam bacias de drenagem bem menores que vários grandes rios, mas a quantidade de material particulado que jogam nos oceanos é muito maior; por exemplo, o rio Amazonas despeja no oceano cerca de 1.400 t/km²/ano, enquanto os pequenos rios destas ilhas somam 3.000 t/km²/ano.

Outros fatores, além do tamanho da bacia de drenagem, influenciam na quantidade de partículas que um rio transporta para o mar; por exemplo, o relevo da bacia, a geologia, o clima e a vazão do rio. As ações humanas nas bacias de drenagem através de desmatamento, agricultura e construção de barragens afetam drasticamente a quantidade de partículas que um rio transporta. Dentre os fatores acima, o relevo é sem dúvida o principal, pois um rio de montanha apresenta maiores velocidades de corrente, e conseqüentemente maior capacidade de transportar partículas.

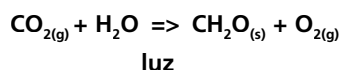
LAGOS – OS PEQUENOS OCEANOS

A outra forma na qual as águas naturais afloram na superfície dos continentes são os lagos, que em vários aspectos são semelhantes aos oceanos. Assim como os oceanos, eles recebem água dos rios, do lençol freático, acumulam sedimentos e apresentam processos biológicos semelhantes. Uma diferença importante é que os lagos têm uma saída de água além da evaporação, seja por um rio (ou canal) ou em subsuperfície. Por este ponto de vista, os lagos podem ser considerados porções de um rio, ou de uma bacia de drenagem, onde a água é retida por períodos de tempo maiores do que em canais fluviais normais. Esta peculiaridade faz com processos biológicos modifiquem diversas características químicas da água.



Atenção: Quando vamos nos banhar em um lago dificilmente nos preocupamos com a presença de correnteza, porque o movimento das águas se dá de forma bem lenta, quase imperceptível. Por outro lado, se o seu passeio inclui um banho de cachoeira, temos sempre a preocupação de ao dar um mergulho não ser levado pela correnteza. Este contraste exemplifica a diferença básica entre estes dois tipos de ecossistema, apesar de ambos se originarem do afloramento do lençol freático.

Com relação aos elementos maiores dissolvidos na água tais como sódio (Na^+), cloreto (Cl^-) e sílica (H_4SiO_4), os lagos não apresentam diferenças marcantes com relação aos rios: os elementos são os mesmos e as fontes também. Porém, quando focamos nossa atenção nos nutrientes essenciais para a biosfera, tais como carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), os processos associados à manutenção das diversas formas de vida aquática modificam de maneira marcante as características das águas presentes em um lago. Este conjunto de processos é conhecido como **metabolismo dos ecossistemas aquáticos**, e suas etapas principais são: **produção, consumo e decomposição**. A produção em um lago está relacionada com a síntese de matéria orgânica por organismos, os assim chamados **produtores primários**, que se utilizam da fotossíntese para transformar elementos ou compostos inorgânicos em matéria orgânica, conforme a **reação simplificada** abaixo:



Nós já sabemos que elementos como nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) estão entre os constituintes essenciais das moléculas orgânicas (**Tabela 3**, aulas 3 e 4), de forma que a equação acima deve realmente ser encarada como simplificada. Porém, ela realça aspectos importantes, tais como a necessidade de luz para que a reação ocorra, a utilização de gás carbônico (CO_2) como fonte de carbono para síntese da matéria orgânica e a liberação de oxigênio (O_2).

Em um lago, os principais produtores primários são as **algas** e as **macrófitas aquáticas**. As algas podem ser flutuantes (**planctônicas**) ou enraizadas no sedimento de fundo (**bentônicas**). No primeiro caso, elas são chamadas genericamente **fitoplâncton**, e tem um tamanho microscópico, não sendo visível a olho nu. Como para realizar a fotossíntese estes organismos necessitam de luz, o fitoplâncton se desenvolve próximo à superfície do lago, enquanto as algas bentônicas ocorrem em áreas rasas próximas à margem onde a luz alcança o fundo do lago. Nesta mesma região marginal ocorrem as macrófitas aquáticas, plantas enraizadas que colonizam áreas rasas protegidas dos lagos, tais como fundo de enseadas e remansos. A taboa (*Typha domingenses*) e o aguapé (*Eichornia crassipes*) são exemplos de macrófitas aquáticas comuns nos lagos.

O **consumo** está relacionado com os organismos que sobrevivem graças à matéria orgânica sintetizada pelos produtores primários. Dentre os **consumidores** temos o **zooplâncton** e os **peixes**. A **decomposição** em ecossistemas aquáticos está associada com **bactérias** e **fungos** que obtêm energia para seu sustento através da decomposição da matéria orgânica originada tanto de organismos mortos (restos de plantas e animais), como de excretas (materiais sólidos e dissolvidos produzidos pelo metabolismo dos organismos, que são liberados na água).

As etapas do metabolismo aquático estão relacionadas entre si, e esta ligação pode ser mais bem entendida observando a **Figura 5**. Nesta figura temos o prisma elementar de um lago, ou, melhor dizendo, da parte central de um lago, pois vimos nos parágrafos acima que próximo às margens ocorrem áreas rasas onde podem estar presentes outros produtores primários além do fitoplâncton (algas bentônicas e macrófitas aquáticas). Nesta figura, podemos distinguir rapidamente o substrato rochoso, o sedimento de fundo e a coluna d'água. Observe que a coluna d'água está dividida em duas partes em função da penetração da luz solar: uma zona próxima à superfície que recebe luz suficiente para os produtores primários realizarem a fotossíntese. Esta zona recebe diferentes nomes, mas no contexto desta disciplina nós iremos identificá-la como **zona eufótica**. Nesta porção iluminada da coluna d'água encontramos o fitoplâncton que realiza a etapa de produção da matéria orgânica. Como os consumidores se alimentam dos produtores primários é natural que eles prefiram ficar perto do seu alimento. Sendo assim, os consumidores (principalmente zooplâncton e peixes) preferem ficar na zona eufótica, bem próximo do fitoplâncton.

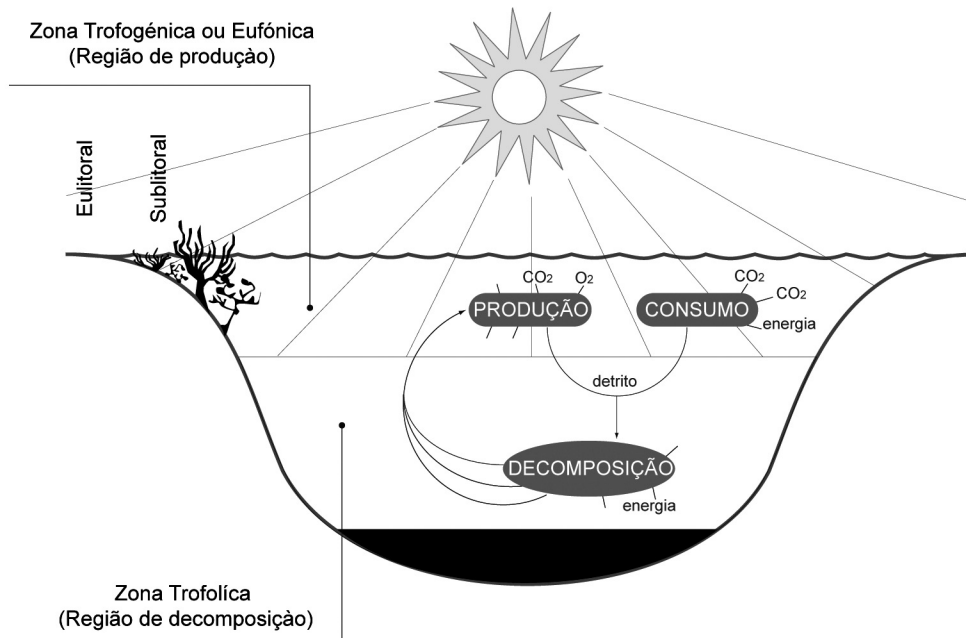


Figura 5: Etapas do metabolismo de um lago destacando a localização de cada uma, bem como os compostos envolvidos. Fonte: ESTEVES, F.A. *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. p. 99.

Ao atingir a superfície de um lago, uma parte da luz solar é refletida de volta para a atmosfera. Conforme a luz penetra na coluna d'água, ela perde intensidade por processos como absorção e dispersão, que dependem, dentre outros fatores, da quantidade de partículas em suspensão na água: quanto maior a quantidade de partículas na água, menor a penetração de luz. Assim o tamanho da zona eufótica varia desde poucos centímetros até vários metros, dependendo, por exemplo, se estamos no período seco ou chuvoso. Abaixo da zona eufótica a presença de luz é insuficiente para que ocorra a fotossíntese, sendo o processo dominante a decomposição.

Com base na **Figura 5** podemos esperar uma diferença na composição química entre a água da superfície (zona eufótica) e do fundo de um lago, em função dos processos de metabolismo aquático. Dentro da zona eufótica os produtores primários ao realizarem a fotossíntese (produção) retiram nutrientes dissolvidos da água do lago, tais como fosfato (PO_4^{3-}) e nitrato (NO_3^-), e liberam oxigênio para a água (vide reação apresentada anteriormente). Na água próxima ao fundo do lago, onde os organismos decompositores atuam, a decomposição acontece através da oxidação da matéria orgânica utilizando o oxigênio dissolvido na água. Desta forma este processo (decomposição) libera os nutrientes que estavam no material orgânico (por exemplo, PO_4^{3-} e NO_3^-) para as águas próximas ao fundo do lago, e diminui o oxigênio dissolvido.

RESUMO

Nestas aulas nós aprendemos que os rios estão interligados com o lençol freático, recebendo dele grande parte da água presente nos canais fluviais. Estas águas transportam materiais que podem ser separados em dissolvido e particulado, e que estes podem ser subdivididos em inorgânicos e orgânicos. O material dissolvido presente nas águas fluviais tem origem na chuva, na interação com a vegetação e/ou uso do solo, na troca catiônica dos argilominerais presentes no solo, e no intemperismo de solos e rochas. Outra fonte importante de materiais para os rios são as modificações que as atividades humanas induzem nas bacias de drenagem, tais como agricultura, pecuária, industrialização e urbanização. Aprendemos também que a composição química das águas fluviais varia tanto durante uma chuva como ao longo do ano. Da mesma forma, constatamos que como o fluxo da água nos lagos é bem menor do que nos rios, a biosfera aquática estabelece modificações na composição das águas através de processos de produção, consumo e decomposição.

EXERCÍCIOS

1. Os materiais transportados pelos rios são genericamente divididos em particulados e dissolvidos. Tendo como base esta divisão inicial, detalhe os tipos de materiais presentes nas águas fluviais, citando um exemplo de cada, bem como sua composição química.
2. Considerando os fluxos hídricos que aparecem em uma bacia de drenagem quando chove, explique porque a sílica em solução nas águas fluviais diminui seu valor durante as chuvaradas. Na mesma situação, o que você acha que aconteceria com os compostos de nitrogênio? Justifique.
3. Qual a semelhança entre as águas fluviais e o lençol freático de uma bacia de drenagem com relação as fontes de elementos maiores em solução? Justifique.

4. Quando falamos na quantidade de material dissolvido que os rios jogam nos oceanos, sabemos que quanto maior o tamanho da bacia, maior a quantidade de material que alcança o mar. Porém, quando o assunto é a quantidade de material particulado que os rios lançam no mar, tamanho de bacia não é documento. Por quê?
5. Cite dois compostos e/ou elementos químicos dissolvidos, exceto coliformes, que você analisaria na água de um rio, para verificar a presença de lançamento de esgoto doméstico. Justifique.
6. Faça um esquema simplificado de uma lagoa, representando as principais etapas do metabolismo de um ecossistema lacustre.
7. Nesta mesma lagoa, coletamos uma amostra de água na superfície da coluna d'água e outra próximo ao fundo. Qual a diferença no conteúdo de CO₂, O₂ e fosfato dissolvidos entre as duas amostras? Justifique.

Leitura recomendada

BERNER, Elisabeth K.; BERNER, Robert A. *Global Environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. Cap. 5.

ESTEVES, FRANCISCO A. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. Cap. 7.

Águas costeiras e oceânicas

Neste módulo, você irá se familiarizar com diversos aspectos relacionados ao nosso maior reservatório de água, o oceano, incluindo seu encontro com as águas continentais, as águas costeiras. A mistura de águas doces e marinhas em diferentes proporções ao longo da costa define um tipo de ambiente que, além de sua importância ambiental, teve um papel decisivo na evolução histórica das populações humanas, os estuários. À semelhança das margens dos rios, os estuários, sejam eles baías (ex: Baía de Guanabara) ou deltas fluviais (ex: estuário do Rio Paraíba do Sul), foram preferencialmente ocupados por assentamentos humanos desde o descobrimento do Brasil. A facilidade de transporte, a disponibilidade de alimento (pesca) e a abundância de água para abastecimento foram fatores fundamentais no sucesso da ocupação destas áreas, que serviram de ponto de partida estratégico para o avanço da colonização em direção ao interior do continente. A dinâmica estuarina e oceânica em seus aspectos principais será abordada nas aulas 27 e 28 deste módulo.

A circulação das águas oceânicas e seu acoplamento com a circulação atmosférica assumem papel central nos dias de hoje, quando enchentes (Europa e Ásia, agosto de 2002) e secas (Estados Unidos, julho e agosto de 2002, com incêndios florestais) de magnitude continentais tomam conta do noticiário. Fenômenos naturais de escala global, tais como **EL NIÑO** e **LA NIÑA**, são assuntos corriqueiros em jornais, revistas e noticiários de televisão, sendo responsáveis pela perda de vidas, pela destruição de patrimônios históricos e prejuízos econômicos. O entendimento dos mecanismos básicos que governam estes fenômenos globais é assunto das aulas 29 e 30.

EL NIÑO

Fenômeno climático caracterizado pela presença de águas mais quentes que o normal no Oceano Pacífico Equatorial, causando alterações climáticas em várias regiões do planeta.

LA NIÑA

Fenômeno climático caracterizado pela presença de águas mais frias que o normal no Oceano Pacífico Equatorial, causando alterações climáticas em várias regiões do planeta.

**Estuários e
oceanos –
Completando o
ciclo hidrológico**

AULAS

27/28

objetivos

- Entender o processo de mistura das águas fluviais e oceânicas nos estuários;
- Compreender as mudanças químicas e biológicas que ocorrem nas águas estuarinas devido à mistura de água doce e salgada;
- Reconhecer os processos de metabolismo de ecossistemas nos oceanos.

Pré-requisitos

Reveja nas aulas 25 e 26 as etapas do metabolismo dos ecossistemas aquáticos.

ESTUÁRIOS

Corpo aquoso litorâneo de circulação mais ou menos restrita, porém ainda ligado a oceano aberto.

OCEANO

Corpo de água salgada de grandes dimensões que em conjunto abrange cerca de 2/3 da superfície terrestre e contém aproximadamente 97% de toda a água existente na Terra.

BAÍA

Trecho côncavo do litoral marinho ou lacustre delimitado entre dois cabos ou promontórios.

LAGOA

Corpo de águas rasas e calmas constituído de água doce.

LAGUNA

Corpo de água semelhante à lagoa localizado próximo à costa, em geral mantendo comunicação restrita com o mar e salinidade variável.

DELTA

Depósito sedimentar formado por um rio que desemboca em um corpo d'água mais ou menos calmo (lago, laguna, oceano), cuja porção subaérea apresenta-se em planta com forma triangular, lobada etc.

Dentro do ciclo hidrológico os rios funcionam como o elo de ligação entre as águas continentais e oceânicas. Ao alcançar o litoral as águas fluviais se misturam em proporções variadas com a água do mar, dando origem aos **ESTUÁRIOS**. Nestas aulas, você vai se familiarizar com este ambiente de transição entre o continente e o mar, através do estudo das características físicas, químicas e biológicas típicas destes ecossistemas.

Os **OCEANOS**, que são o maior reservatório de água do planeta, apesar das suas dimensões e de uma série de processos naturais ainda não totalmente compreendidos (p.ex. circulação oceânica e seu papel na regulação do clima), apresentam várias semelhanças com seus primos, os lagos ou “os pequenos oceanos”. Você aprenderá, por exemplo, que os processos de metabolismo de ecossistemas aquáticos que atuam nos corpos d'água continentais também estão presentes nas águas oceânicas.

OS ESTUÁRIOS – ONDE OS RIOS ENCONTRAM O MAR

Podemos definir um estuário como um corpo d'água parcialmente fechado onde a água doce dos rios se mistura com a água salgada do mar. Os estuários e seu entorno são áreas de transição entre o continente e o mar, sendo a parte do ciclo hidrológico, onde ocorre a mudança da hidrosfera de água doce para a hidrosfera marinha. A interação com os oceanos faz com que os estuários sejam afetados pelas marés, sendo porém, uma porção da costa protegida da ação de ondas, ventos e tempestades. Um exemplo de uma área costeira que está sujeita à ação direta do oceano são as praias.

Os estuários podem ser de diversas formas e tamanhos e recebem diferentes nomes tais como **BAÍAS**, **LAGOAS**, **LAGUNAS** e **DELTA**. Tenha em mente que todos os corpos d'água costeiros com estas diferentes denominações, por exemplo: Baía de Guanabara (RJ), Lagoa dos Patos (RS), delta do Rio Paraíba do Sul (RJ) são estuários, pois a característica que define um estuário é a mistura da água doce com a salgada.

Os estuários são paisagens únicas, com uma variedade de habitats para pássaros, mamíferos e peixes, tais como manguezais e brejos, servindo de berçário para vários organismos marinhos, bem como de refúgio para aves migratórias. Esta importância ecológica dos estuários reside nas suas características físicas, químicas e biológicas. E o uso racional dos seus recursos só é possível graças ao entendimento dos principais processos atuantes neste ambiente.

CIRCULAÇÃO DE ÁGUA NOS ESTUÁRIOS

Do ponto de vista hidrológico, os estuários podem ser considerados como vales de rios inundados por uma mistura de água doce e marinha. Existe uma variedade de padrões de circulação de água em estuários que dependem da magnitude dos fluxos fluviais e da ação das **MARÉS** (Figura 1).

MARÉ

Subida ou descida periódica dos níveis marinhos e de outros corpos d'água ligados ao oceano, causadas pela atração do Sol e da Lua.

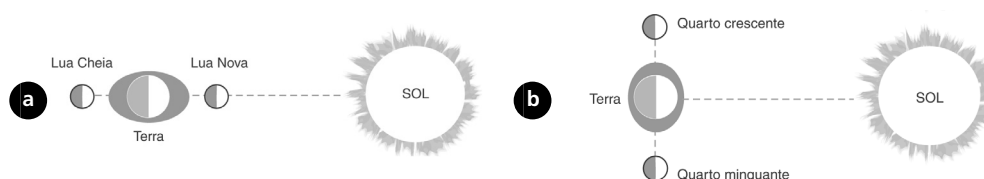


Figura 1: Posições da Lua e do sol em relação à Terra durante as marés de sizígia (a) e de quadratura (b). Fonte: SUGUIO, K. *Dicionário de Geologia Marinha*. São Paulo: T.A.Queiroz Editor, 1992. p. 81.

O caso mais simples é quando a ação de mistura da maré é mínima, e o rio tende a fluir em direção ao mar formando uma camada de água doce menos densa sobre uma água do mar mais densa. Esta diferença de densidade é resultado da quantidade de elementos em solução, ilustrado na Tabela 1. O total de elementos e/ou compostos dissolvidos na água do mar é da ordem de 35.000 mg/L, enquanto nos rios este total fica em torno de 100 mg/L. Desta forma a água do mar tem uma **SALINIDADE** em torno de 35 (g/kg ou parte por mil) enquanto a salinidade da água do rio é quase zero. Como a densidade da água é função da quantidade de elementos e/ou compostos em solução, a densidade da água do mar é maior do que nas águas fluviais: densidade da água doce $\sim 1,001 \text{ g/cm}^3$; densidade da água do mar $\sim 1,034 \text{ g/cm}^3$.

SALINIDADE

Medida do teor de sais dissolvidos na água, representado pelo peso total em gramas da quantidade total de sais contidos em 1kg de água, isto é, em partes por mil; a salinidade normal dos oceanos varia entre 33 e 37 ‰.

Tabela 1: Abundância média de elementos e compostos na água do mar e dos rios (média mundial). Fonte: BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p. 313¹. BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p. 188-192²

| Concentração (mg/L) | Mar ¹ | Rios ² |
|---------------------------------|------------------|-------------------|
| Na ⁺ | 10.770 | 5,3 |
| K ⁺ | 399 | 1,5 |
| Ca ⁺² | 412 | 13 |
| Mg ⁺² | 1.290 | 3,1 |
| Cl ⁻ | 19.354 | 6,0 |
| SO ₄ ⁻² | 2.712 | 1,6 |
| HCO ₃ ⁻ | 120 | 52 |
| H ₄ SiO ₄ | 2,8 | 11 |

Para melhor entender esta mistura da água doce com a salgada vamos utilizar o estuário do Rio Paraíba do Sul (RJ) como exemplo (**Figura 2**). Para tanto, você deve rever a **Figura 3** das aulas 25 e 26, que apresenta a variação da vazão do Rio Paraíba do Sul ao longo do ano: vazões da ordem de $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ no período de chuvas (verão) e cerca de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ no período seco (inverno).

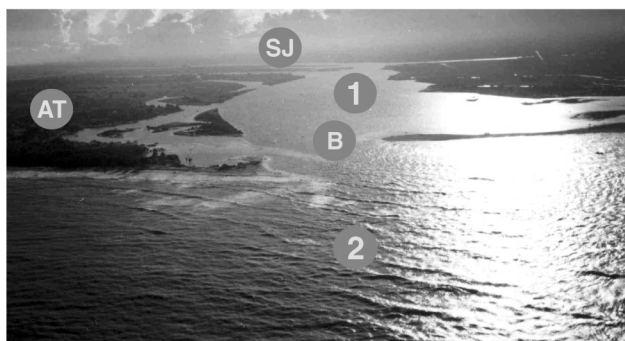


Figura 2: Vista aérea do Estuário do Rio Paraíba do Sul, Rio de Janeiro. O rio corre da parte superior para parte inferior da foto. Notar a barra de areia aberta (B) separando o estuário interno (1) e o estuário externo (2). Também são indicadas as cidades de São João da Barra (SJ) e Atafona (AT). Fonte: Acervo do Laboratório de Ciências Ambientais, CBB, UENF.

AMPLITUDE DE MARÉ

Diferença entre os níveis das águas oceânicas na preamar e na baixa-mar.

MARÉ DE SIZÍGIA

Maré com amplitude máxima, isto é, cujos níveis correspondem aos valores mais altos e mais baixos em relação ao nível médio do mar. Ocorre quando a Lua e o Sol se encontram alinhados em relação à Terra.

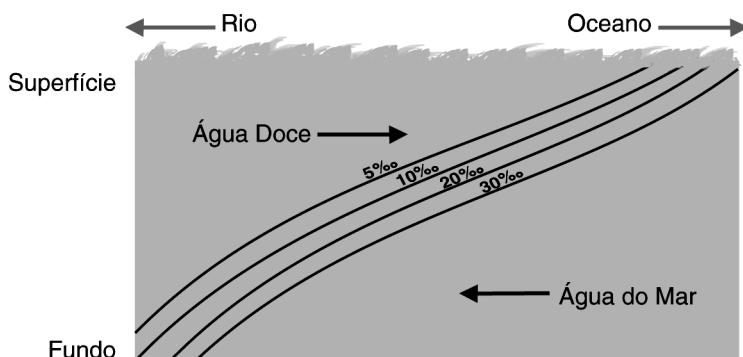
MARÉ DE QUADRATURA

Maré com amplitude menor que a maré média local, que ocorre quando a Lua e o Sol se encontram em quadratura em relação à Terra.

Uma variação de quase 10 vezes! Então, quando o rio está com uma vazão baixa, a mistura com a água do mar acontece na porção interna do estuário entre São João da Barra e Atafona. Agora, quando a vazão é muito alta, esta mistura ocorre na porção externa do estuário. Neste caso, a porção interna do estuário é ocupada somente por água doce. Da mesma forma, a **AMPLITUDE DA MARÉ** varia de acordo com o ciclo lunar (28 dias), com as maiores marés (**SIZÍGIA**) ocorrendo em períodos de lua cheia e nova, e as menores marés (**QUADRATURA**) associadas com a lua crescente e minguante (**Figura 1**). A variação da vazão do rio, ao longo do ano, conjugada com a alternância de marés ao longo do mês, gera um sistema altamente dinâmico, conferindo uma complexidade natural aos processos estuarinos.

Na **Figura 3** temos uma representação simplificada de como se daria a mistura das águas entre São João da Barra e Atafona (no estuário interno), quando o rio está no período de baixa vazão. Com a subida da maré, a água do mar entra pelo fundo devido à sua maior densidade, enquanto a água do rio, menos densa, tende a ficar mais na superfície. Entre estes dois tipos de água forma-se uma zona de mistura, onde a

salinidade da água próxima à superfície tende a ficar mais doce, enquanto com o aumento da profundidade a salinidade sobe. Este tipo de estuário chama-se **CUNHA SALINA**. Existem outros tipos, tais como estratificado e misturado, que estão além do escopo desta disciplina, e são tratados dentro da oceanografia.



ESTUÁRIO DE CUNHA SALINA

Quando as águas fluviais fluem sobre as marinhas (mais densas) formando uma cunha de água salgada no fundo.

Figura 3: Esquema representando a mistura de águas no Estuário do Rio Paraíba do Sul entre São João da Barra e Atafona. Esta situação é esperada quando o rio está no período de baixa vazão e a maré alta de grande amplitude (sizígia), ocasião em que a mistura ocorre dentro do estuário interno. Fonte: modificado de BERNER, E.K.; BERNER, R.A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. p. 287.



Atenção: Lembre-se de que a situação apresentada na **Figura 3** não é estática. Ela só se mantém enquanto a maré está alta. Quando a maré desce, a água doce volta a predominar na porção interna do estuário, entre São João da Barra e Atafona. Geralmente um ciclo de maré dura 12 horas, de modo que temos duas marés altas por dia.

QUÍMICA DOS ESTUÁRIOS – ELEMENTOS CONSERVATIVOS E NÃO-CONSERVATIVOS

Estuários são os principais locais onde os dois maiores tipos de água da superfície do planeta se misturam. Neste encontro vários processos químicos e biológicos acontecem ao longo do gradiente de salinidade gerado, que alteram a composição química das águas. Os materiais dissolvidos e particulados presentes nas águas estuarinas interagem entre si e com o sedimento de fundo. Estes processos aumentam ou diminuem a quantidade de material que os rios transportam para o mar.

Coletando-se uma série de amostras de água ao longo do estuário entre o rio e o mar, pode-se montar um modelo geral de comportamento dos elementos, dividindo-os em conservativos e não-conservativos. Na **Figura 4** temos representados os gráficos que seriam obtidos plotando a concentração dos elementos de interesse contra a concentração de cloreto.

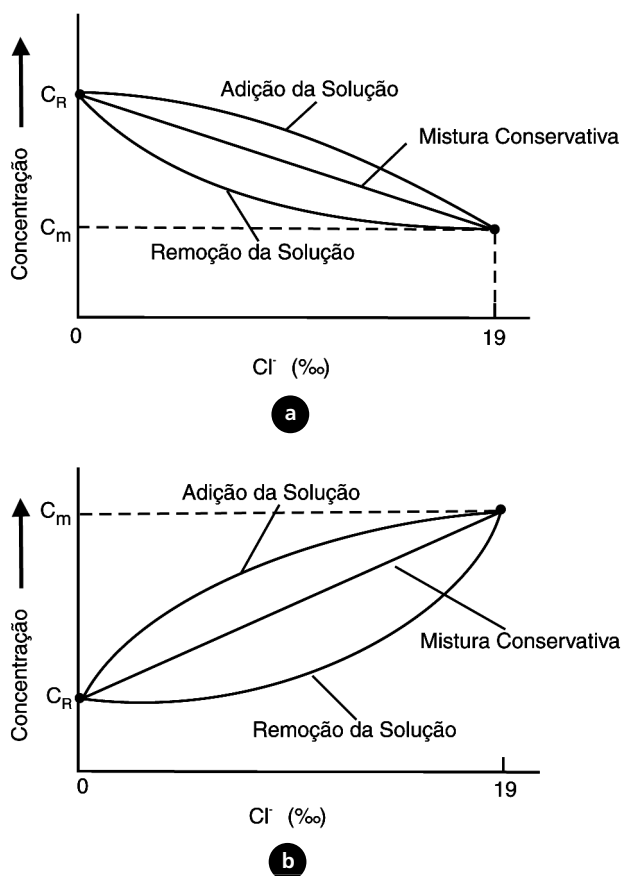


Figura 4: Representação gráfica idealizada dos comportamentos conservativo e não-conservativo dos elementos durante a mistura da água do rio com a água do mar em um estuário. No eixo horizontal está representada a concentração de cloreto nas águas em ‰ (parte por mil), e no eixo vertical o elemento de interesse. No gráfico A a concentração do elemento é maior no rio (C_R) que no mar (C_M), enquanto no gráfico B a concentração do elemento é maior no mar (C_M) do que no rio (C_R). Fonte: modificado de BERNER, E.K.; BERNER, R.A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. p. 291.

O eixo horizontal dos gráficos representa o conteúdo de cloreto (Cl^-) nas amostras, variando de 0 ‰ (água doce) até 19 ‰ (água do mar), como indicador do gradiente de salinidade do estuário. No eixo vertical temos a concentração dos elementos dissolvidos analisados. Observe a semelhança dos gráficos com o formato de uma folha, com uma linha reta no meio e duas linhas curvas, uma na parte de cima e outra embaixo.

Sabemos que existem elementos que são mais abundantes na água do mar do que nos rios, tais como cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}), e elementos cuja concentração é maior na água dos rios do que no mar, como sílica (H_4SiO_4) e nitrogênio (NH_4^+). Assim, quando a água do rio (pobre em cálcio, por exemplo) entra no estuário e começa a se misturar com a água do mar (rica em cálcio), ocorre um aumento progressivo do conteúdo de cálcio na água estuarina, ao longo do gradiente de salinidade (do rio em direção ao mar, ou da esquerda para a direita na **Figura 4.b**). Caso a variação da concentração do elemento nas águas estuarinas, no caso do cálcio, seja função somente da mistura da água doce com a salgada, sem influência de processos químicos e biológicos, teremos uma linha reta (no meio da “folha”) indicando um aumento linear da concentração. Então, o elemento é classificado de **CONSERVATIVO**, pois a variação da sua concentração ao longo do estuário só responde ao processo físico de mistura das águas.

Por outro lado, se o elemento em questão for o nitrogênio, ou seja, um elemento que é essencial para a biosfera (vide **Tabela 1**, Aula 1), o quadro se modifica. Primeiro porque, neste caso, a água do rio tem mais nitrogênio que a água do mar, então o gráfico de “folha” que representa o seu comportamento está na **Figura 4.a**. Além disto, por ser um elemento essencial para a biosfera, sua concentração nas águas estuarinas vai ser afetada, não só pela mistura das águas do rio e do mar, mas também por processos biológicos (produção e decomposição), ou seja, a sua variação de concentração ao longo do gradiente de salinidade não mais segue uma linha reta. Quando o fitoplâncton estuarino retira o nitrogênio dissolvido da água para produção de biomassa, a concentração na água fica menor do que a esperada só pela mistura, e a sua variação ao longo do estuário vai seguir a linha curva inferior da “folha”. Quando o elemento tem sua concentração aumentada por processos químicos e biológicos ao longo do gradiente de salinidade, sua variação vai seguir a linha curva superior da “folha”. Nos dois casos o elemento apresenta um comportamento **NÃO-CONSERVATIVO**, pois sua variação de concentração ao longo do gradiente de salinidade é afetada tanto pela mistura das águas quanto por processos biológicos e químicos.

ELEMENTO CONSERVATIVO

Classificação de um elemento cuja concentração em qualquer ponto de um estuário é condicionada apenas pelo processo físico de mistura das águas fluviais e oceânicas.

ELEMENTO NÃO-CONSERVATIVO

Classificação de um elemento cuja concentração em qualquer ponto de um estuário é condicionada não só pelo processo físico de mistura das águas fluviais e oceânicas, mas também pelo consumo ou liberação do mesmo em solução por processos químicos ou biológicos.



Atenção: É importante lembrar que a água dos rios, antes de alcançar o oceano e cumprir seu papel no ciclo hidrológico, passa pelos estuários. Esta passagem é acompanhada por mudanças em vários materiais que os rios transportam (particulados e dissolvidos), através de processos químicos e biológicos.

OCEANOS – A HIDROSFERA SALGADA

ELEMENTOS MAIORES

Elementos cuja concentração nas águas naturais são expressas em mg/L ou ppm (parte por milhão).

A principal e determinante característica que diferencia os oceanos dos ambientes costeiros (por exemplo, lagunas e estuários) é a sua composição química relativamente uniforme. Quando comparado com outros componentes da hidrosfera, é surpreendente a constância da sua composição química para os **ELEMENTOS MAIORES** em solução. Este fato pode ser atribuído a vários fatores, dentre eles o padrão de circulação das correntes oceânicas, que tendem a homogeneizar as águas ao redor do planeta (**Figura 5**). Assim, se você pegar uma amostra de água oceânica, ou seja, longe da costa e fora da influência dos rios, em qualquer dos oceanos, a salinidade será quase idêntica e a concentração dos elementos maiores seguirá os valores apresentados na **Tabela 1** destas aulas, com variações de no máximo 10% em torno deles. Ou seja, os elementos maiores podem ser chamados de conservativos.

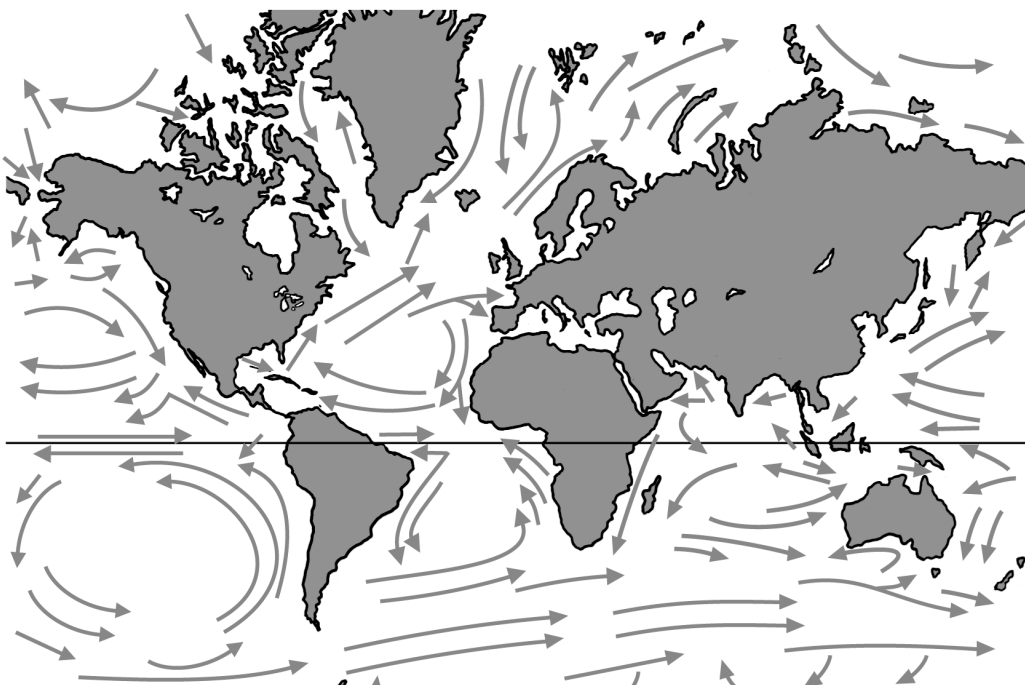


Figura 5: Correntes superficiais dos oceanos. Fonte: modificado de BERNER, E.K.; BERNER, R.A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. p. 19.

Muitos elementos dissolvidos nas águas oceânicas que estão em baixas concentrações (**Tabela 2**), em contraste com os elementos mais abundantes, apresentam variações de concentração de um local para outro. O oxigênio (O_2) e o dióxido de carbono (CO_2), dois gases intimamente relacionados com processos de metabolismo de ecossistemas aquáticos, podem variar sua concentração em até 10 vezes. Nitrato (NO_3^-) e sílica (H_4SiO_4 ; utilizado por **DIATOMÁCEAS**), nutrientes amplamente utilizados pelo fitoplâncton marinho, têm uma variação de mais de 100 vezes. Em outras palavras, eles podem ser chamados de **não-conservativos**.

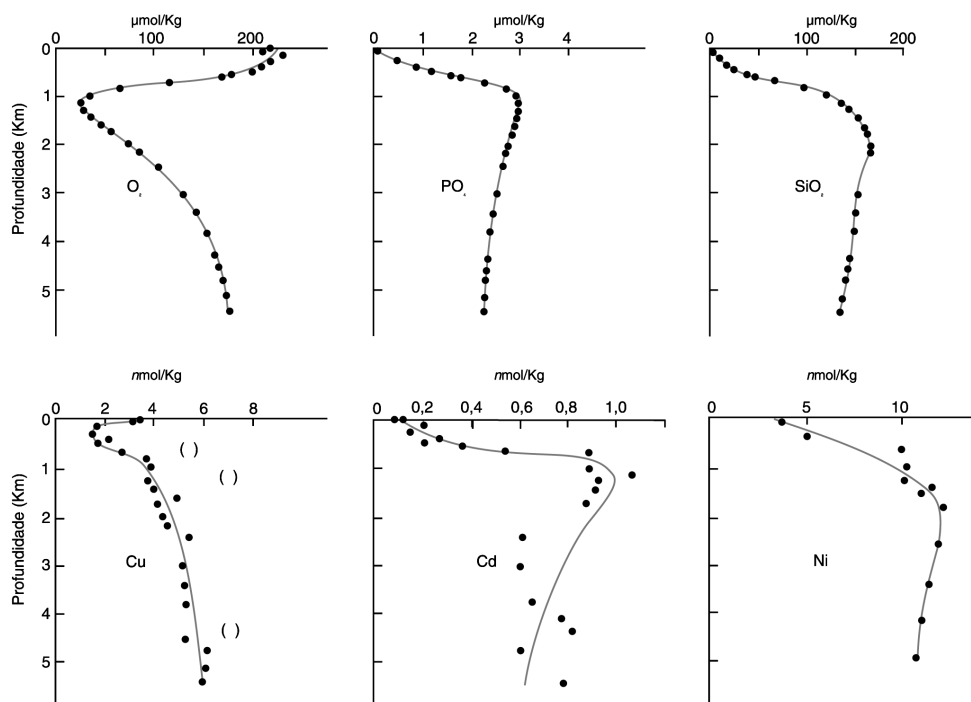
DIATOMÁCEAS

Algas unicelulares autótrofas, capazes de realizar fotossíntese. São bentônicas ou planctônicas e habitam a zona fótica de oceanos, mares, lagos e rios.

Tabela 2: Elementos menores dissolvidos na água do mar; dados em mg/kg. Fonte: Modificado de BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p. 314.

| Componente | Faixa de Concentração |
|---------------|-----------------------|
| Br^- | 66.000 – 68.000 |
| F^- | 1.000 – 1.600 |
| CO_3^{-2} | 3.000 – 18.000 |
| O_2 | 320 – 9.600 |
| CO_2 | 440 – 3.500 |
| $Si-H_4SiO_4$ | <30 – 5.000 |
| $N-NO_3^-$ | <60 – 2.400 |
| $N-NH_4^+$ | <2 – 40 |
| $P-PO_4^{-3}$ | <10 – 280 |

À semelhança de seus “pequenos primos” continentais, os lagos os oceanos também apresentam processos biológicos de metabolismo de ecossistemas aquáticos: produção, consumo e decomposição (veja Figura 5, aulas 25 e 26). Desta maneira, se pegarmos amostras de água oceânica em diferentes profundidades e analisarmos elementos e/ou compostos que estão envolvidos no metabolismo de ecossistemas aquáticos, tais como oxigênio dissolvido (O_2) e fosfato (PO_4^{-3}), obteremos os resultados apresentados na **Figura 6**. Nesta Figura, observamos que a distribuição vertical de muitos elementos não-conservativos nas águas oceânicas é bastante similar, e é facilmente explicada por processos biológicos. Ao nos fixarmos nos gráficos de oxigênio dissolvido e fosfato, podemos notar que eles apresentam padrões de variação opostos.



Com a penetração de luz na porção superficial dos oceanos (algumas dezenas de metros), a atividade fotossintética do fitoplâncton – **PRODUÇÃO** – libera oxigênio dissolvido e retira fósforo da água, resultando em uma maior oxigenação e um empobrecimento de fósforo próximo à superfície. Dentro da cadeia alimentar marinha, o zooplâncton se alimenta do fitoplâncton – **CONSUMO** –, sendo a localização tanto do processo de produção como de consumo semelhante aos lagos, ou seja, dentro da zona fótica. A diferença principal é que, com a grande profundidade dos oceanos, o processo de **DECOMPOSIÇÃO**, que nos lagos acontece próximo ao sedimento de fundo, nos oceanos acontece na **COLUNA D'ÁGUA**. Como resultado, ocorre uma queda acentuada de oxigênio acompanhada de um forte aumento de fósforo, já a partir da primeira centena de metros (Figura 6). Desta forma, podemos observar que as águas oceânicas em subsuperfície são enriquecidas de nutrientes dissolvidos em relação às águas superficiais.

PRODUÇÃO

Etapa do metabolismo de ecossistemas aquáticos que está relacionada com a síntese de matéria orgânica por organismos, os assim chamados produtores primários, que se utilizam da fotossíntese para transformar elementos ou compostos inorgânicos em matéria orgânica.

CONSUMO

Etapa do metabolismo de ecossistemas aquáticos relacionada com os organismos que sobrevivem graças à matéria orgânica sintetizada pelos produtores primários.



Atenção: Observe que os valores de profundidade na Figura 6 são da ordem de quilômetros, enquanto nos lagos raramente a profundidade ultrapassa 300 metros. Assim, nos lagos, o sedimento de fundo participa ativamente dos processos de metabolismo aquático, enquanto nos oceanos, devido à grande profundidade, o sedimento de fundo não tem influência nos processos que ocorrem na zona fótica. Releia sobre metabolismo de ecossistemas aquáticos nas aulas 25 e 26.

Em algumas áreas costeiras, como Cabo Frio (RJ), condições favoráveis de correntes, ventos e geomorfologia (tanto de plataforma continental como da linha de costa) dão origem a um fenômeno chamado **RESSURGÊNCIA**, que é caracterizado pela subida das águas ricas em nutrientes localizadas em subsuperfície para dentro da zona fótica, em superfície. Este aporte de nutrientes alimenta o fitoplâncton, aumentando significativamente a produtividade costeira. Lembre-se de que o fitoplâncton é a base da cadeia alimentar costeira, e que este enriquecimento irá propiciar um maior estoque pesqueiro (aumento da população de peixes). Na costa peruana, o fenômeno da ressurgência é mais intenso, dando origem a um dos locais de maior atividade pesqueira do mundo.

Sabendo que a clorofila é um indicador da produtividade primária, podemos observar pela **Figura 7** que as zonas mais produtivas dos oceanos estão localizadas próximas aos continentes, sendo que na parte central dos oceanos a produtividade é quase inexistente. Esta distribuição está relacionada com o aporte de nutrientes pelos rios nas áreas costeiras, que favorecem o crescimento do fitoplâncton. Como o fitoplâncton é a base da cadeia alimentar marinha, fica claro por que as áreas de pesca mais importantes do mundo estão localizadas próximas à margem dos continentes.

DECOMPOSIÇÃO

Etapa do metabolismo de ecossistemas aquáticos associada com bactérias e fungos que obtêm energia para seu sustento, através da decomposição da matéria orgânica originada tanto de organismos mortos como de excretas.

COLUNA D'ÁGUA

Termo utilizado para designar a camada de água que constitui os ecossistemas aquáticos.

RESSURGÊNCIA

Afloramento na superfície dos oceanos de uma água mais fria e rica em nutrientes oriunda de zonas mais profundas; ocorre próximo à costa em função de ventos, correntes oceânicas e formato da costa.

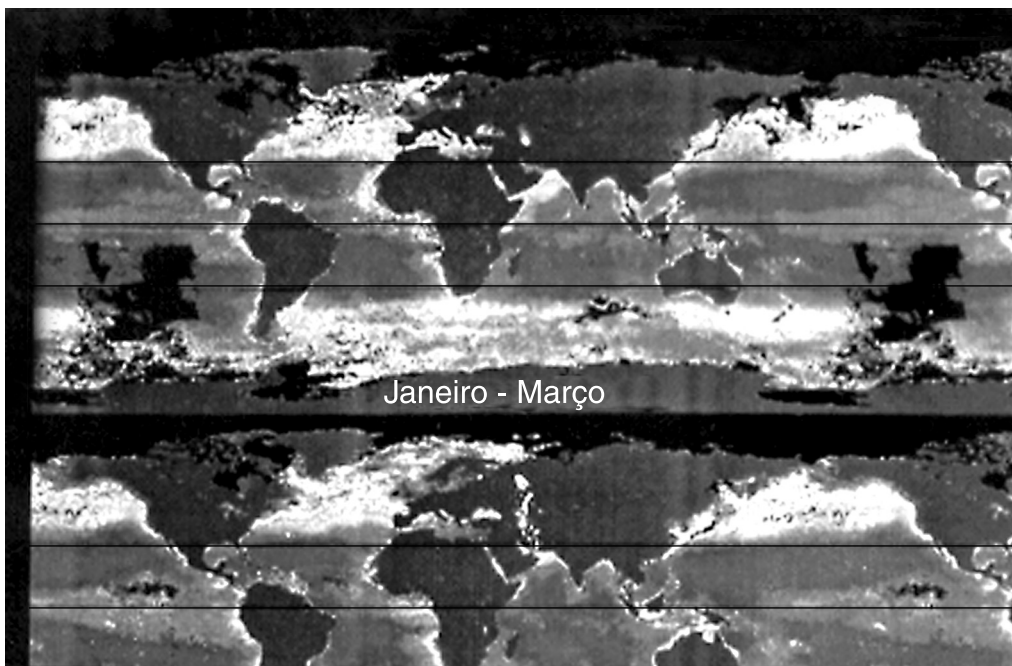


Figura 7: Distribuição de clorofila nos oceanos do mundo. Notar desenho dos continentes e áreas claras oceânicas próximas aos mesmos. As áreas claras representam águas com maior valor de clorofila, enquanto áreas escuras dos oceanos correspondem a baixos valores de clorofila. Fonte: Modificado de FALKOWSKI, P.G. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles, *Photosynthesis Research*, Lubbock, n.39, p. 235-258, 1994.

RESUMO

Ao longo destas aulas, aprendemos que os estuários são corpos d'água parcialmente fechados, onde a água doce dos rios se mistura com a água salgada do mar. Existem variados padrões de mistura de água em estuários, que dependem da magnitude dos fluxos fluviais e da ação das marés. Com a subida da maré, as águas oceânicas atingem regiões mais internas dos estuários, e com a descida da maré, as águas oceânicas ficam restritas a regiões mais externas. A dinâmica estuarina está relacionada com as variações sazonais nos fluxos fluviais e as mudanças da maré com o ciclo lunar. Existem diferentes tipos de estuário, classificados em função do grau de mistura das águas. Estuários do tipo de cunha salina são aqueles nos quais, com a subida da maré, a água do mar entra pelo fundo devido à sua maior densidade, enquanto a água do rio, menos densa, tende a ficar mais na superfície. Também pudemos entender que os oceanos apresentam processos metabólicos semelhantes aos lagos, tendo como resultado uma zona em subsuperfície enriquecida em nutrientes dissolvidos. Esta água enriquecida, quando consegue alcançar a zona fótica, dá origem ao fenômeno da ressurgência, caracterizado pelo aumento da produtividade primária. Através da distribuição da clorofila nos oceanos, ficou claro que as áreas mais produtivas estão próximas aos continentes, devido ao aporte de nutrientes dos rios.

EXERCÍCIOS AVALIATIVOS

1. Após o estudo destas aulas, defina, com as suas palavras, o que você entende por um estuário.
2. Quais os principais fatores/processos físicos que podem dar origem a um estuário do tipo cunha salina? Justifique.
3. Os compostos de nitrogênio dissolvidos nas águas estuarinas (nitrato e amônio, por exemplo) apresentam um comportamento não-conservativo. Explique este tipo de comportamento, e represente graficamente a variação da concentração destes elementos ao longo do estuário.

4. Na sua opinião, por que os elementos maiores dissolvidos nos oceanos apresentam uma concentração relativamente uniforme?
5. A ressurgência é um fenômeno caracterizado pelo afloramento próximo à costa de uma água subsuperficial oceânica enriquecida em nutrientes. Descreva os processos que promovem este enriquecimento subsuperficial de nutrientes nas águas oceânicas.
6. Você concorda com a utilização da clorofila como indicador de produtividade de águas oceânicas? Justifique.

PARA PENSAR

Se as regiões oceânicas de maior produtividade primária (indicada pela maior concentração de clorofila) estão localizadas próximas às margens dos continentes, a maior parte dos oceanos do mundo pode ser considerada verdadeiros “desertos de vida”. Talvez por esta razão, as nações estejam empenhadas em defender o mar de 200 milhas, pois não só recursos minerais estão presentes nestas áreas (por exemplo, a produção de petróleo na Bacia de Campos, RJ), mas também os maiores estoques pesqueiros estão dentro do limite do assim chamado “mar territorial”.

Leitura recomendada

BERNER, Elisabeth K.; BERNER, Robert A. *Global Environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. Cap. 5.

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p.

**Circulação
atmosférica e
oceânica – El Niño
e La Niña**

AULAS

29/30

objetivos

- Compreender a relação entre o ciclo hidrológico e os fluxos de massa e energia na superfície terrestre;
- Identificar os padrões globais de circulação atmosférica;
- Conhecer os tipos de circulação de massa d'água oceânica;
- Entender o fenômeno da ressurgência;
- Conhecer os fenômenos climáticos El Niño e La Niña e suas conseqüências.

Pré-requisitos

Repasse o conteúdo dos módulos 1 e 5 e das aulas 27 e 28.

Nas aulas anteriores dessa disciplina, você, estudante, pôde entender um pouco mais sobre a importância da água para o nosso planeta. Dentre outras importantes funções relacionadas aos seres vivos, a água presente na superfície terrestre é a grande responsável pelo (a):

- diversificação de ambientes propícios à existência de seres vivos;
- solubilização de nutrientes importantes presentes em rochas;
- transporte de massa de elementos constituintes dos seres vivos até os diferentes habitats;
- formação dos solos, importantes substratos ricos em nutrientes.

Nas aulas 1 e 2, em especial, você aprendeu um pouco mais sobre o ciclo da água e os ciclos biogeoquímicos dos elementos. Esperamos que o estudo de algumas características da litosfera, no Módulo 2 da disciplina, tenha facilitado a compreensão das interações desta com a hidrosfera, algumas das quais foram discutidas no Módulo 3. No Módulo 5, foi dado destaque ao papel das interações entre as geosferas na composição química das águas continentais, enfocando a chuva, o lençol freático, os rios e lagos.

Você provavelmente se lembra que a maior parte da massa de água do nosso planeta se encontra nos oceanos. A circulação das massas de águas oceânicas está intimamente relacionada com a circulação atmosférica, atores importantes no sistema de suporte de vida da Terra, objeto de estudo das aulas que encerram nossa disciplina.

INTRODUÇÃO

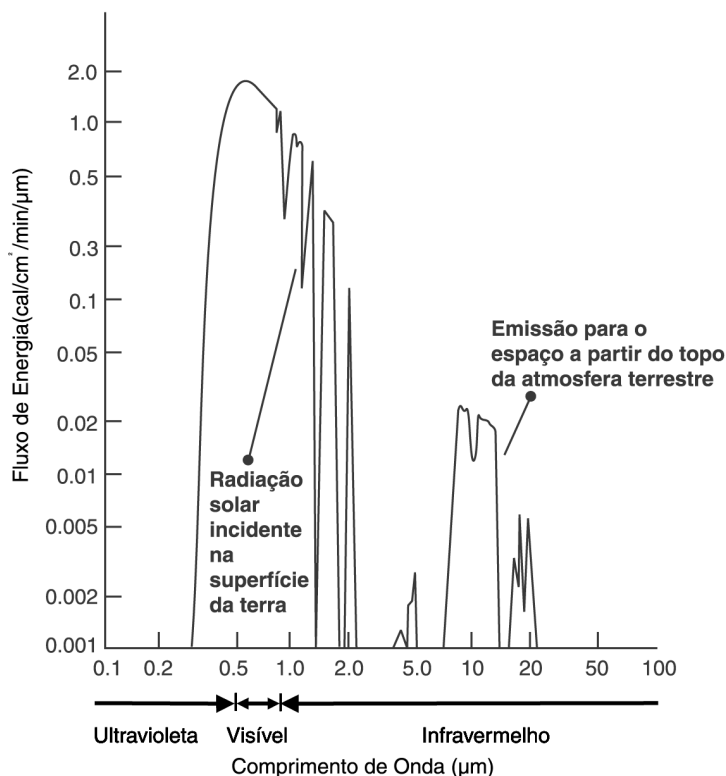
CLIMA

Padrão de tempo médio durante um período de tempo longo; na região Nordeste do Brasil predomina o clima semi-árido; tempo condições atmosféricas locais em um instante específico. Ex.: hoje vai chover.

Estas aulas discutem a interação entre a atmosfera e os oceanos e os aspectos gerais que governam a sua circulação global, que em última análise é responsável pelo **CLIMA** no nosso planeta. Para entender um pouco sobre dois dentre os componentes fundamentais do sistema de suporte de vida na Terra – circulação atmosférica e oceânica –, precisaremos aprender algumas noções sobre a distribuição da energia na superfície terrestre, e sua importância para a meteorologia e oceanografia. Com base nos conceitos discutidos, poderemos conhecer melhor os fenômenos de ressurgência, do El Niño e da La Niña.

O CICLO DA ENERGIA – A MÁQUINA CLIMÁTICA TERRESTRE

O ciclo de energia na superfície terrestre é o responsável pela existência do ciclo hidrológico, e, em particular, pelo movimento do vapor d'água na atmosfera, o qual, por sua vez, afeta também o ciclo da energia. A principal fonte de energia para a superfície terrestre é a **RADIAÇÃO SOLAR**, responsável pela quase totalidade do fluxo de energia. Outras fontes de menor importância são o fluxo de calor do interior terrestre e a energia das marés, que fogem ao objetivo de nossa discussão. Vamos, portanto, falar apenas da energia solar. Para melhor compreender essa energia, lembre-se do conceito de **COMPRIMENTO DE ONDA**, aprendido no ensino médio, e do espectro eletromagnético, apresentado na **Figura 1**.



RADIAÇÃO SOLAR

Radiação eletromagnética emitida pelo Sol. Essa forma de energia viaja pelo espaço como um campo oscilatório composto por uma perturbação elétrica e magnética na direção perpendicular às perturbações.

COMPRIMENTO DE ONDA

É a distância entre picos sucessivos de uma onda eletromagnética.

Figura 1: Comprimento de onda da radiação solar incidente na superfície da Terra e da radiação refletida a partir da atmosfera. Fonte: modificado de BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p. 11.

ALBEDO

Fração da energia solar refletida para o espaço sem alteração de comprimento de onda. É uma medida do brilho da Terra vista do espaço.

A energia solar atinge o topo da atmosfera e é em parte refletida, em parte absorvida e em parte convertida em outras formas de energia, em proporções que são apresentadas na **Figura 2**. Nessa figura, podemos observar a existência de dois componentes básicos. Um componente representa a radiação de pequeno comprimento de onda ($< 4\mu\text{m}$) que simplesmente é refletida o espaço. Essa fração da energia solar recebe o nome de **ALBEDO**. O albedo é uma medida do brilho que a Terra apresenta, vista do espaço. Observe na **Figura 2** que quase metade dessa energia é refletida pelas nuvens, o que dá uma idéia da importância da cobertura de nuvens para o aquecimento da superfície terrestre. O outro componente representa a radiação que é absorvida e irradiada para o espaço na forma de radiação infravermelha (1 a $100\mu\text{m}$), a partir da superfície terrestre e de vários componentes da atmosfera (observe outra vez a **Figura 2**).

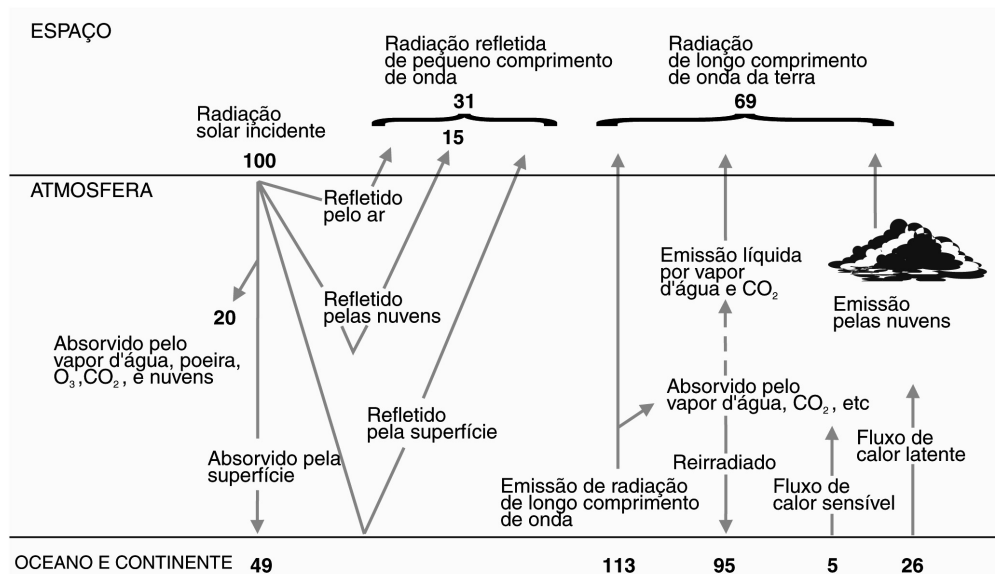


Figura 2: Radiação média anual e balanço de calor da atmosfera e da Terra; a radiação solar incidente (343 watts/m^2) é considerada igual a 100 unidades. Fonte: modificado de BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p. 8.

A maior parte da energia emitida pelo Sol está na forma de radiação de pequeno comprimento de onda ($< 4\mu\text{m}$), sendo o pico da radiação nos comprimentos de onda visíveis ($0,4$ a $0,7\mu\text{m}$). Parte dessa radiação visível, ou luz, penetra a atmosfera e alcança a superfície da Terra. Graças a isso, existe vida no nosso planeta, já que ela tal como a conhecemos é dependente de luz para a atividade dos organismos fotossintetizantes. Em contraste, quase toda a radiação ultravioleta ($0,1$ a $0,5\mu\text{m}$) é absorvida

pelo ozônio presente nas camadas mais altas da atmosfera, o que protege os seres vivos de seus efeitos nocivos. A radiação infravermelha emitida pelo Sol é em grande parte absorvida pelo vapor d'água atmosférico, pelo CO₂ e por gotículas de água nas nuvens. Assim, a energia emitida pelo Sol que finalmente atinge a superfície da Terra é composta por apenas determinados comprimentos de onda “filtrados” pela atmosfera, representando cerca de 50% da energia total incidente.

A superfície da Terra retorna parte dessa energia ao espaço e à atmosfera, na forma de longos comprimentos de onda ($> 4\mu\text{m}$), com um máximo em torno de $10\mu\text{m}$. A energia emitida pela superfície terrestre nessa faixa de comprimento de onda é absorvida na atmosfera pelo vapor d'água, CO₂, e por outros gases como metano (CH₄); só uma pequena fração escapa para o espaço. A maior parte dessa energia é irradiada novamente para a superfície terrestre, onde é reabsorvida, mantendo a Terra aquecida.

O vapor d'água e o CO₂ atmosférico desempenham um importante papel, permitindo a passagem da energia solar de pequeno comprimento de onda para a superfície terrestre, e absorvem e irradiam de volta para a superfície terrestre a maior parte da energia de comprimento de onda longo emitido por ela, mantendo assim aquecida a superfície da Terra. Esse é o conhecido efeito estufa, e você já leu um pouco sobre esse assunto, nas aulas 21 e 22.

Do ponto de vista dos fluxos de energia, para que a temperatura na superfície terrestre permaneça constante, a energia solar que chega à sua superfície deve ser balanceada pela emissão de energia para a atmosfera e para o espaço, mais os fluxos de **CALOR SENSÍVEL** e **CALOR LATENTE** emitidos da superfície.

O calor sensível é o calor transmitido por simples **CONDUÇÃO** e por **CONVECÇÃO**. O calor flui da superfície terrestre para a atmosfera simplesmente porque em geral esta está mais quente, e esse processo é conhecido como condução de calor. O ar aquecido tende a subir e ser substituído por ar mais frio oriundo de camadas mais altas da atmosfera, em um processo conhecido como convecção.

CALOR SENSÍVEL

quando um corpo recebe ou cede calor, ocorrendo uma variação em sua temperatura.

CALOR LATENTE

quando um corpo recebe ou cede calor, ocorrendo uma mudança de estado físico.

CONDUÇÃO

transferência de energia na forma de calor entre dois corpos, sem transporte de matéria associado.

CONVECÇÃO

transferência de calor através do movimento de quantidades de matéria.

Quando a água passa do estado líquido para o estado de vapor, ela absorve energia. Essa energia é chamada calor latente e é transferido de volta para a atmosfera na forma de calor quando o vapor d'água é condensado. Uma vez que evaporação e condensação podem ocorrer em locais diferentes, muito distantes um do outro, o transporte de massas de ar contendo vapor d'água envolve também o transporte de calor.

COMO VARIA A INTENSIDADE DA ENERGIA SOLAR RECEBIDA EM DIFERENTES PONTOS DA TERRA?

LATITUDE

Distância de um ponto qualquer na superfície terrestre ao plano equatorial, medido em graus e relativo ao centro da Terra.

A quantidade de energia solar recebida pela superfície terrestre diminui conforme aumenta a **LATITUDE**, a partir do Equador em direção aos pólos. Essa variação é responsável pela circulação oceânica e atmosférica, e, conseqüentemente, pelo ciclo hidrológico. A variação de intensidade da energia solar que alcança a superfície terrestre deve-se a dois fatores: o primeiro está relacionado à forma aproximadamente esférica do planeta e o segundo relaciona-se à duração do dia.

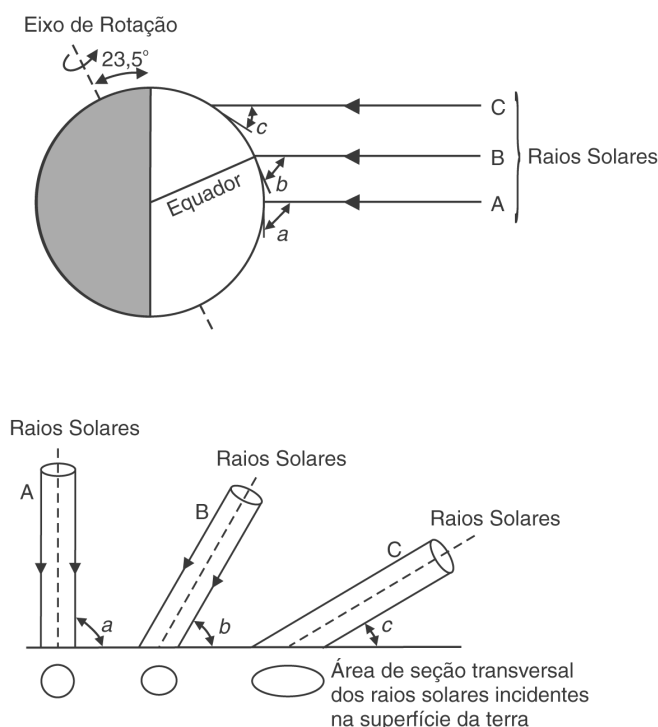


Figura 3: Diagramas mostrando as variações de intensidade da radiação solar (energia por unidade de área) com o ângulo de incidência da superfície terrestre; baixos ângulos resulta que a mesma energia se espalha por uma área maior. Fonte: modificado de BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p.13.

O fato de a forma da Terra assemelhar-se uma esfera acarreta a variação do ângulo com que os raios solares atingem a superfície entre o Equador e os pólos. Como se pode ver na **Figura 3**, nos pólos, a mesma quantidade de radiação irá incidir sobre uma área muito maior do que em baixas latitudes, perto do Equador. O primeiro fator é que os raios solares deverão percorrer um trecho mais longo da atmosfera até atingir os pólos, ocorrendo, portanto, maior absorção de energia.

O segundo fator, relacionado à duração do dia, pode ser melhor compreendido quando observamos que o eixo polar da Terra está inclinado cerca de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em redor do Sol (**Figura 4**). Em consequência, conforme mudam as estações do ano, também varia a quantidade de radiação recebida pela superfície terrestre. Observe na Figura 4 os Pólos Norte e Sul, por exemplo. Durante o verão no Hemisfério Norte, ao longo da rotação da Terra em torno do seu eixo, o Pólo Norte está sempre recebendo diretamente os raios solares e os “dias” serão de 24 horas. Já no Pólo Sul, que ocupará a posição de sombra da Terra durante toda a rotação, as “noites” é que terão a duração de 24 horas. Próximo ao Equador essa variação sazonal é muito menor, e por isso essa região recebe mais energia por unidade de área do que as latitudes maiores.

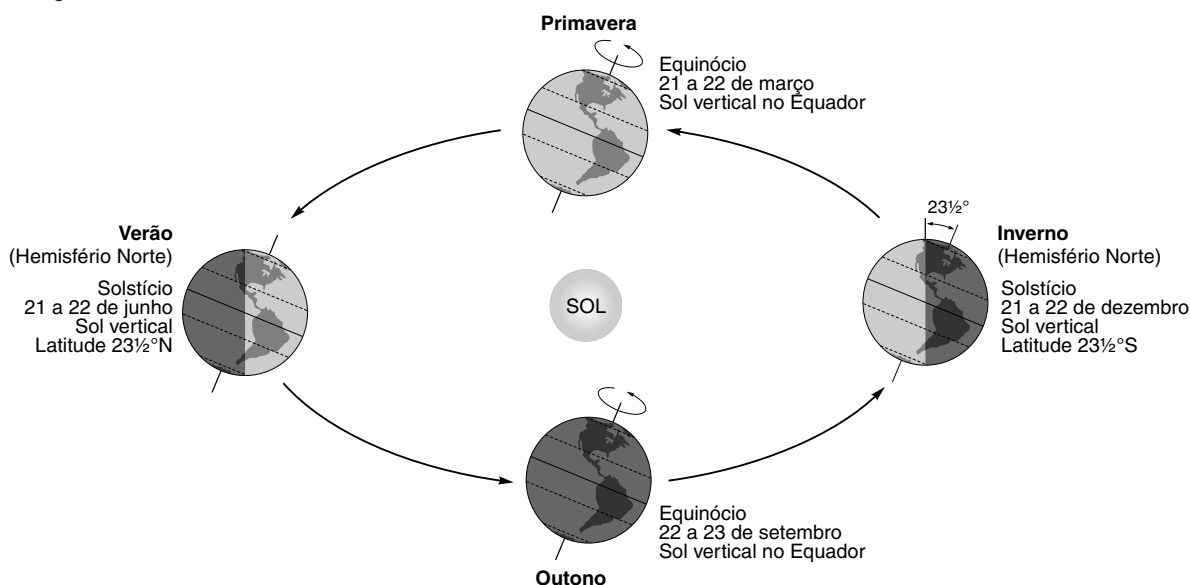


Figura 4: Revolução da Terra em sua órbita ao redor do Sol, mostrando as estações do ano no Hemisfério Norte; no Hemisfério Sul é o oposto. Fonte: modificado de BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p. 14.

A radiação de comprimento de onda longa que é emitida para o espaço também varia com a latitude, embora com menor intensidade. A diferença entre a radiação solar recebida e a emitida de volta ao espaço, em diferentes latitudes, resulta em um padrão de circulação atmosférica e oceânica. Entre as latitudes de 35°Norte e 35°Sul e os respectivos pólos ocorre uma deficiência líquida de radiação (a quantidade emitida para o espaço é maior do que a quantidade recebida). Porém, entre essas mesmas latitudes e o Equador ocorre o inverso.

Assim observamos que o efeito somado da variação do ângulo de incidência dos raios solares com a latitude e as variações sazonais da quantidade de luz ao longo do dia faz com que a quantidade de radiação incidente próximo ao Equador seja máxima, diminuindo em direção aos pólos, em ambos os hemisférios. Poderíamos também argumentar que como o Hemisfério Norte é dominado por continentes, enquanto no Hemisfério Sul predominam os oceanos, e o albedo da água é diferente da terra, teríamos diferenças de radiação solar recebida. Porém, medidas feitas por satélites mostram que o albedo anual médio é praticamente igual entre os dois hemisférios, uma vez que a importância da cobertura de nuvens para esta propriedade é maior do que a diferença entre terra e água.

A transferência de calor das latitudes tropicais e subtropicais para as latitudes temperadas e polares ocorre por três vias: correntes oceânicas que transportam águas mornas; ventos que transportam massas de ar aquecidas e transporte de calor latente na forma de vapor d'água. Os fatores que governam estas “correias transportadoras globais de calor” são apresentados a seguir.

CIRCULAÇÃO DA ATMOSFERA

A circulação da atmosfera obedece a um padrão geral apresentado na **Figura 5**. Nela, podemos observar que o padrão de circulação é dividido em “células”, cuja **distribuição é semelhante nos dois hemisférios**: (a) uma célula estende-se do Equador até as latitudes de 30° - Células de Hadley; (b) a segunda célula localiza-se entre as latitudes de 30° e 60° - Células de Ferrel; (c) a terceira célula começa em 60° de latitude e vai até os pólos - Células Polares.

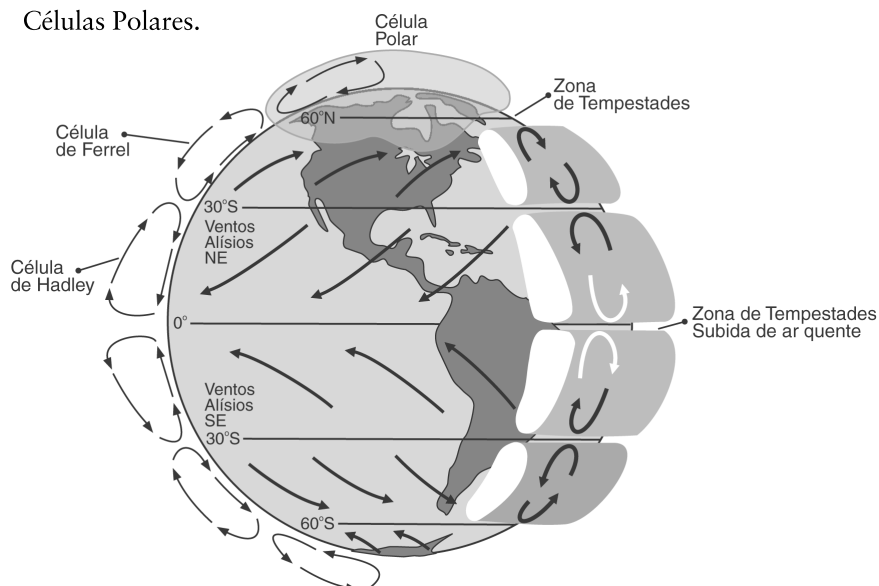


Figura 5: Representação da circulação geral da atmosfera. Fonte: modificado de BERNER, E.K; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. p. 17.

A quantidade de energia absorvida próximo ao Equador é maior do que a energia emitida, nessa área, para o espaço. Sendo assim, o ar fica mais aquecido nessa região equatorial e tende a subir, visto que sua densidade diminui. Existe uma tendência de o ar se deslocar em direção aos pólos. Esse deslocamento não se dá em movimentos com direção norte-sul, ao longo de meridianos. O movimento das massas de ar sofre um desvio em consequência do movimento de rotação da Terra. Tal rotação origina forças que deslocam as massas de ar para a direita, no Hemisfério Norte, e para a esquerda no Hemisfério Sul, e o conjunto dessas forças recebe o nome de **FORÇA DE CORIOLIS**.

As massas de ar aquecidas que sobem na altura do Equador atingem camadas mais altas da atmosfera, onde ocorre a condensação do vapor, resultando em intensa precipitação com liberação do calor latente. Essas massas de ar, então, migram em direção a latitudes mais altas e nesse percurso vão esfriando, e descem novamente em direção à superfície terrestre perto das latitudes de 30° Norte e 30° Sul. O ar descendente é muito seco e conforme desce vai sendo aquecido e sua capacidade de absorver umidade aumenta. Em consequência, ocorre intensa evaporação na superfície terrestre, dando origem a diversas regiões desérticas entre as latitudes de 30° Norte e 15° Sul. Ao alcançar a superfície terrestre, as massas de ar deslocam-se outra vez em direção ao Equador, sendo desviadas pela Força de Coriolis. As massas de ar dos dois hemisférios encontram-se no Equador, onde iniciam novo ciclo (Célula de Hadley).

As massas de ar descendentes na latitude de 30° não se direcionam totalmente para o Equador. Parte dessas massas de ar se deslocam próximo à superfície terrestre em direção aos pólos até alcançar as massas polares na altura de 50°, em uma região de grande instabilidade meteorológica, com tempestades e abundante precipitação. Nesta região, as massas polares são aquecidas pelo encontro com as massas de ar mais aquecidas ocorrendo então nova subida, com parte das massas de ar retornando e fechando as Células de Ferrel, enquanto as massas polares por sua vez também se movimentam na Célula Polar (observe novamente a **Figura 5**).



Lembre-se: A distribuição dos grandes **BIOMAS** ao longo da Terra, desertos e florestas tropicais por exemplo, não é aleatória. Ela é a resposta da biosfera à circulação global atmosférica, e à consequente distribuição desigual de energia e água entre o Equador e os pólos.

FORÇA DE CORIOLIS

A rotação da Terra resulta em forças que deslocam as massas de ar para a direita no Hemisfério Norte e para a esquerda no Hemisfério Sul, e o conjunto dessas forças recebe o nome de **Força de Coriolis**.

BIOMA

É um conceito utilizado para organizar a variação em larga escala da biosfera, baseado em características biológicas dominantes. Exemplos de biomas: floresta tropical, savana e deserto.

CIRCULAÇÃO OCEÂNICA

Os oceanos podem ser divididos em duas porções em relação aos padrões de circulação. Uma porção superficial, entre a superfície e 300m de profundidade, que apresenta-se bem misturada pelo vento e cuja circulação é predominantemente lateral, impulsionada pelo vento. Abaixo dessa camada as águas são mais frias, menos misturadas, e subdivididas em camadas de densidade crescente. A circulação das águas mais profundas é resultado de variações de densidade devido a diferenças de temperatura e salinidade, e é conhecida como **CIRCULAÇÃO TERMO-HALINA**.

CIRCULAÇÃO TERMO-HALINA

Movimento de águas oceânicas profundas originado a partir das diferenças de densidade das águas em função de mudanças na temperatura e salinidade.



Camadas no Oceano: um oceano não é uma massa homogênea de água. Em função do aporte de energia solar descrito no início destas aulas, a temperatura e a salinidade da água do mar se modificam, contribuindo para o controle da densidade e para a formação de três grandes camadas nos oceanos (maior salinidade significa maior densidade; baixa temperatura também significa maior densidade): uma camada superficial (até 300 m de profundidade) de água relativamente quente (e conseqüentemente menos densa); uma zona logo abaixo (de 300 a 1500 m de profundidade) ao longo da qual a temperatura diminui rapidamente com a profundidade – termoclina; e a zona profunda (abaixo de 1500 m de profundidade) que contém cerca de 80% da água dos oceanos.

A CIRCULAÇÃO OCEÂNICA SUPERFICIAL

O padrão de circulação superficial pode ser descrito como uma série de correntes circulares, que seguem o sentido horário no Hemisfério Norte e anti-horário no Hemisfério Sul (veja Figura 5, aulas 27 e 28). As forças que regem esses padrões são uma combinação da Força de Coriolis (rotação da Terra) com os desvios causados pelo encontro das massas de água com os continentes, e ainda a interação com os ventos.

Um caso especial de circulação superficial é a **RESSURGÊNCIA COSTEIRA**. Uma combinação especial dos fatores descritos acima resulta no deslocamento das águas costeiras superficiais, que é substituída por águas frias mais profundas. Tais águas são enriquecidas em nutrientes (relembre as aulas 27 e 28) o que acaba aumentando a produtividade fitoplanctônica, com reflexos em toda a cadeia trófica, incluindo a produtividade pesqueira. Como exemplos de ressurgência costeira temos Cabo Frio (RJ) e a costa peruana.

RESSURGÊNCIA COSTEIRA

Afloramento na superfície dos oceanos de águas frias e enriquecidas em nutrientes. Originadas de regiões mais profundas ocorrem em áreas restritas.

CIRCULAÇÃO TERMO-HALINA

Abaixo da zona superficial, bem misturada do oceano, a circulação é regida por diferenças de temperatura e salinidade entre diferentes camadas de água. A densidade da água do mar aumenta continuamente conforme a temperatura diminui, também ocorrendo um aumento da salinidade. As águas oceânicas profundas (abaixo de 500 m de profundidade) apresentam-se estratificadas, isto é, estão divididas em camadas de água distintas com características de temperatura, salinidade e densidade diferentes entre si, sendo raro a circulação de água entre estas camadas. Sendo assim, a circulação profunda das massas de água é predominantemente horizontal.

As águas superficiais apresentam variações em sua densidade decorrentes de processos superficiais tais como aquecimento, evaporação, congelamento, adição de águas doces etc. Quando forma-se o gelo, por exemplo, os sais dissolvidos são excluídos e as águas remanescentes tornam-se mais salinas e, conseqüentemente, mais densas. Essa densidade pode aumentar tanto que a camada superficial torna-se mais densa do que a camada abaixo, ocorrendo então a substituição. Uma vez alcançadas maiores profundidades, a circulação passa a ser predominantemente lateral. Durante a circulação termo-halina as águas profundas permanecem sem contato com a atmosfera durante longos períodos de tempo: no Oceano Atlântico 200-500 anos e no Oceano Pacífico 1000-2000 anos.

EL NIÑO E LA NIÑA – EXEMPLO DE INTERAÇÃO ENTRE GEOSFERAS

Um dos exemplos mais atuais da interação entre as geosferas na superfície terrestre é o fenômeno do El Niño, que acopla atmosfera e camadas superficiais do oceano, e afeta drasticamente não só o clima, mas também a pedosfera e a biosfera, incluindo seres humanos. Ele é um fenômeno climático natural que ocorre em ciclos de 3 a 7 anos, aparecendo na região tropical do Oceano Pacífico, e cujos efeitos climáticos são sentidos em escala global. O nome El Niño tem origem no fato de o impacto deste fenômeno na costa da América do Sul ocorrer próximo ao período do Natal.

O nome técnico deste fenômeno é ENSO, abreviatura de “*El Niño* – *Southern Oscillation*”. Para entender melhor o que ele representa, observe a **Figura 6**. Nela são representadas as condições normais de vento e temperatura da água superficial, na região tropical do Oceano Pacífico, entre a Indonésia e a América do Sul. O padrão normal é composto pelos ventos alísios soprando de leste para oeste sobre o Equador, uma ressurgência de água fria no leste (costa da América do Sul), e empilhamento de água morna no oeste (Indonésia). Nestas condições, formam-se uma zona de baixa pressão com chuvas em abundância na Indonésia e uma zona de alta pressão próxima à América do Sul, associadas com uma ressurgência que faz aflorar uma água rica em nutrientes próximo à costa, aumentando a produtividade primária, e conseqüentemente o estoque pesqueiro (veja as aulas 27 e 28).

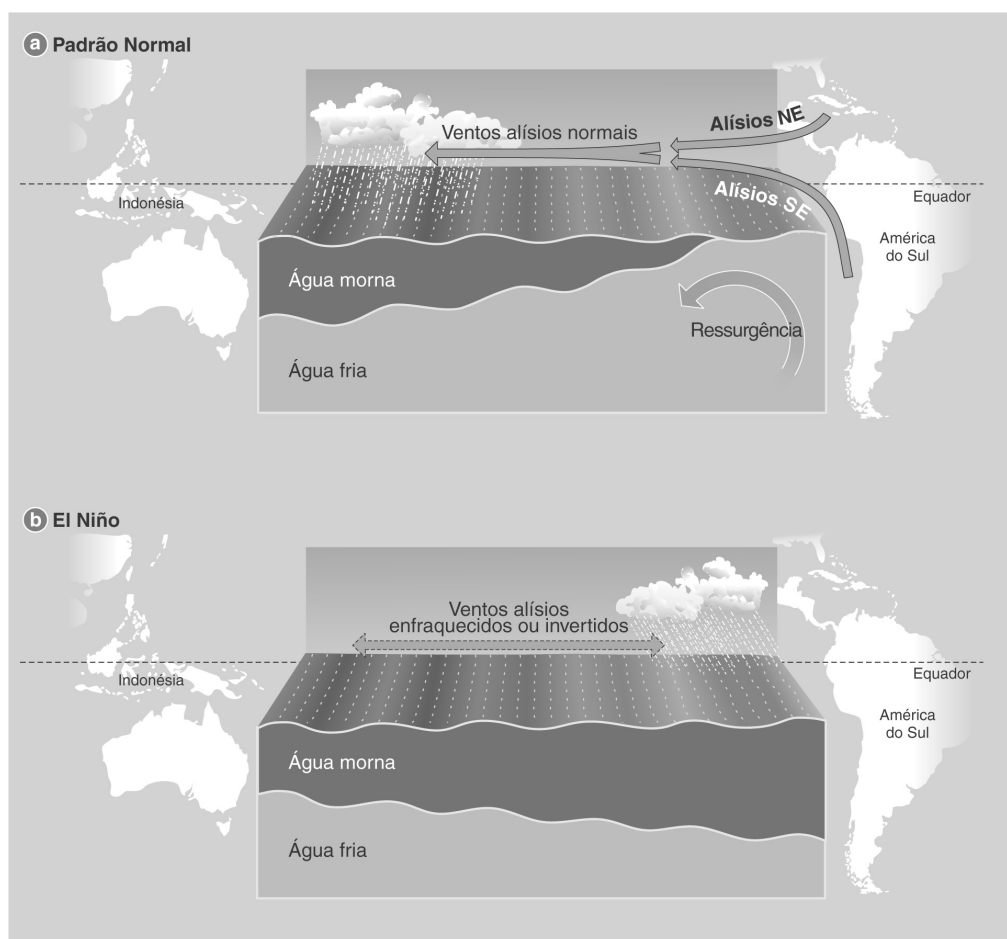


Figura 6: Desenho representando as condições climáticas e oceânicas do Oceano Pacífico durante um ano normal (a) e durante o fenômeno do El Niño (b). Fonte: modificado de PRESS, F.; SIEVER, R. *Understanding Earth*. New York: W.H. Freeman and Co., 2001. p. 555.

Quando o El Niño se instala, os ventos alísios que sopram de leste para oeste tornam-se fracos, ou mesmo invertem a direção (**Figura 6**). Ao mesmo tempo, inverte-se também a distribuição das zonas de pressão atmosférica, ou seja, forma-se uma zona de alta pressão próxima à Indonésia e uma de baixa pressão próxima à América do Sul. Ao formar-se este quadro, as águas mornas que antes se restringiam à área ao largo da Indonésia, agora espalham-se pela zona tropical do Oceano Pacífico. Quando esta massa de água aquecida atinge o continente Sul-americano, ela se espalha para Sul e para Norte ao longo da costa, impedindo a formação da ressurgência. Estas águas mornas são pobres em nutrientes dissolvidos, quando comparadas com as águas frias da ressurgência, tendo como consequência a diminuição da produtividade primária, e também do estoque pesqueiro. Este aquecimento das águas do Pacífico pode atingir de 1 a 5°C, como no El Niño de 1982/1983, um dos mais fortes deste século. Não subestime o aparente “pequeno” aumento de temperatura, pois quando ele ocorre em larga escala (ao longo de um oceano), os efeitos são sentidos em escala global. Por exemplo, com o aquecimento das águas oceânicas, aumenta a taxa de evaporação, e conseqüentemente o volume de chuvas. Outro efeito importante do El Niño de 1982/1983 foi a diminuição da produtividade primária no Oceano Pacífico tropical em 20 vezes, com reflexos diretos em toda cadeia alimentar marinha.

Mas as consequências do El Niño não se restringem ao Oceano Pacífico. Em 1982/1983 vários distúrbios climáticos foram associados a este fenômeno, como por exemplo: seca no Nordeste Brasileiro e na África Equatorial; enchentes no Sul do Brasil e na Península Ibérica; tempestades na costa oeste dos Estados Unidos; frio extremo na Groenlândia. O El Niño de 1991-92 provocou a maior seca do século XX na África, afetando cerca de 100 milhões de pessoas.

O EL NIÑO FAVORECE O APARECIMENTO DE EPIDEMIAS DE MALÁRIA E DENGUE?

Recentemente têm aumentado as evidências de associação entre as condições climáticas extremas associadas ao fenômeno El Niño e o aparecimento de epidemias. Em regiões de clima seco, as chuvas fortes associadas com o El Niño podem criar alagados, que servem de ambiente ideal para reprodução de mosquitos. Por outro lado, em climas muito úmidos, as secas originadas diminuem drasticamente a vazão de rios, originando uma série de alagados, que também são propícios à reprodução dos mosquitos. As generalizações para associar proliferação de vetores de doenças e o El Niño não são tão simples, uma vez que a transmissão local depende das espécies de vetores e sua relação com duração e volume de chuvas.

Como exemplo podemos citar alguns relatos médicos que registram repetidos surtos de malária em ciclos de aproximadamente 5 anos em alguns países como Índia, Venezuela e Colômbia. O El Niño também estaria associado ao aparecimento de epidemias de malária no Equador, Peru e Bolívia após as enchentes de 1983, sendo que a epidemia no Equador foi dramaticamente acentuada pelo enorme número de desabrigados pelas enchentes. O aumento do risco de surtos de doenças transmitidas por mosquitos não se restringe à malária, estendendo-se também à dengue.

O mosquito transmissor da dengue é menos sensível aos padrões de chuva, sendo que as altas temperaturas associadas com o El Niño podem ter um efeito na transmissão do vírus. O aparecimento de epidemias pode não acontecer, mesmo com condições climáticas favoráveis, pois a população local pode já ser imune. Em 1998, muitos países da Ásia sofreram um aumento incomum nos casos de dengue e dengue hemorrágica, sendo alguns atribuídos ao El Niño. Esta polêmica está longe de acabar, mas a Organização Mundial de Saúde está ciente desta hipótese, e procura orientar seus trabalhos para respondê-la o mais breve possível (visite o site da Organização Mundial de Saúde apresentado no final destas aulas).

LA NIÑA – A OUTRA FACE DO ENSO

O El Niño tem uma “irmã”, La Niña, que aparece cerca de um ano após o El Niño, mas ela nem sempre se manifesta. La Niña é caracterizada por fortes ventos alísios, temperaturas mais baixas do que o normal

nas águas superficiais do Pacífico Tropical próximas ao continente Sul-americano, e mais quentes nas águas próximas à Indonésia. As anomalias climáticas originadas pela La Niña são geralmente o oposto das atribuídas ao seu “irmão”. Em 1999, um fenômeno La Niña foi associado com secas prolongadas na costa leste dos Estados Unidos.

POR QUE EL NIÑO E LA NIÑA APARECEM E DESAPARECEM?

Atualmente existe um programa de monitoramento do Oceano Pacífico por meio de centenas de bóias equipadas com sensores. Estas bóias estão distribuídas ao longo do Pacífico Tropical, e os dados são coletados via satélite (*Tropical Atmosphere Ocean Project*; visite o site listado no final da aula). Como sabemos que a circulação atmosférica está acoplada à circulação dos oceanos, dados meteorológicos e oceanográficos (temperatura, salinidade, velocidade e direção de correntes da superfície até 500 m de profundidade) vêm sendo analisados conjuntamente, de forma a entender a complexidade deste fenômeno. Já temos uma visão geral do que acontece durante o El Niño e La Niña. Mas apesar da tecnologia utilizada, ainda estamos longe de entender o fenômeno de forma a poder prever seu aparecimento e sua intensidade.

PARA PENSAR

Algumas hipóteses têm sido levantadas para explicar o ciclo de 3-7 anos do El Niño. Dentre elas estariam os ciclos de explosões Solares (a cada 11 anos), e sua relação com o albedo do Oceano Pacífico, que, pelas suas dimensões, absorve uma quantidade de energia maior do que todos os outros oceanos do mundo somados. Outra hipótese estaria relacionada com uma influência maior do que se pressupunha até então, da circulação termo-halina (profunda) dos oceanos sobre os padrões climáticos globais. O fenômeno El Niño, com seus efeitos devastadores sobre a sociedade humana, e as várias hipóteses que tentam explicá-lo, mostram-nos que a interação das geosferas pode ser mais intensa do que imaginamos, e expõe as limitações do nosso conhecimento sobre o sistema de suporte de vida da Terra.

RESUMO

Nas últimas aulas deste curso, foram enfocados fenômenos naturais que fazem parte do sistema de suporte de vida do nosso planeta – a circulação atmosférica e oceânica em escala global. Eles são um ótimo exemplo de como a interação entre as geosferas pode influenciar vários aspectos da nossa vida. Também foram apresentados alguns conceitos fundamentais relacionados com a distribuição da energia solar incidente na superfície terrestre, que associada com a Força de Coriolis, define os padrões climáticos globais. Foi ressaltado que a circulação oceânica superficial (até 300 m de profundidade) tem uma interação muito maior com a atmosfera do que a circulação termo-halina, que ocorre em grandes profundidades. Dois dos fenômenos relacionados com os aspectos listados acima é o El Niño e La Niña (ENSO) cujos efeitos sobre o clima são sentidos em escala planetária. As anomalias climáticas geradas por estes “irmãos”, podem estar relacionadas com o agravamento de epidemias de doenças tais como malária e dengue em diferentes partes do mundo.

EXERCÍCIOS AVALIATIVOS

1. Descreva com suas palavras qual o destino da energia solar ao atingir a atmosfera terrestre.
2. Por que a quantidade de energia solar recebida pela superfície terrestre varia com a latitude? Como esta energia é redistribuída?
3. A distribuição das grandes zonas desérticas do planeta não é aleatória. Utilizando os conceitos de circulação atmosférica explique a localização destas áreas.
4. Por que as correntes superficiais oceânicas giram no sentido anti-horário no Hemisfério Sul?
5. Quais as mudanças que ocorrem no Oceano Pacífico que dão origem ao fenômeno El Niño?
6. Você acredita na ligação entre o El Niño e as epidemias de doenças de veiculação hídrica?

Sites recomendados

Site sobre Clima e saúde:

Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS/OMS). Brasil Informativo: Clima e Saúde. Disponível em: <www.opas.org.br/sistema/fotos/clima.htm>. Acesso em: 22 out. 2002.

Site sobre mudanças climáticas e saúde humana

World Health Organization. Climate change and human health: Impact and adaptation. Disponível em: <http://whqlibdoc.who.int/hq/2000/WHO_SDE_OEH_00.4.pdf>. Acesso em 25 maio 2005.

Site sobre El Niño:

World Health Organization. El niño and its health impacts. Fact Sheet, n. 192. Revised March, 2000. Disponível em: <<http://www.who.int/inf-fs/en/fact192.html>>. Acesso em: 23 out. 2002.

National oceanic and atmospheric administration. What is an El Niño? Disponível em: <<http://www.pmel.noaa.gov/tao/el-nino/el-nino-story.html>>. Acesso em: 23 out. 2002.

Site do Projeto TAO – Tropical Atmosphere Ocean Project

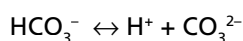
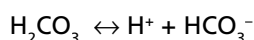
National oceanic and atmospheric administration. Tropical Atmosphere Ocean Project. Disponível em: <<http://www.pmel.noaa.gov/tao>>. Acesso em: 23 out. 2002.

Dinâmica da Terra

Gabarito

1. Os componentes da paisagem que afetam a composição química das águas fluviais são:

- **Atmosfera** – A água da chuva reage com o dióxido de carbono atmosférico, tornando-se levemente acidificada, através da formação do ácido carbônico conforme abaixo:



Outros compostos podem ser incorporados à água da chuva por lavagem atmosférica e chegar ao canal fluvial, como Na^+ , Cl^- , H^+ , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , K^+ , NO_3^- e NH_4^+ .

- **Vegetação** – Ao atravessar a copa das árvores a água é retida pela vegetação e, depois, goteja sobre o solo ou escorre pelo caule das plantas; neste percurso, a água modifica sua composição antes de atingir o solo. A matéria orgânica morta (serrapilheira) é fonte de nutrientes que são carregados para o subsolo (processos de lixiviação e exudação);

- **Solos e rochas** – Os minerais presentes nos solos e nas rochas são fontes de muitos compostos químicos, que são retirados através do lento processo de intemperismo. Estes compostos são transportados pela água de percolação para o lençol freático e daí para o canal fluvial ou diretamente através do escoamento superficial para os rios.

2.

carbono, C – CO_2 atmosférico;

oxigênio, O – hidrosfera e atmosfera (água e CO_2);

hidrogênio, H – hidrosfera;

nitrogênio, N – chuva e gases atmosféricos (fontes primárias); e matéria orgânica;

potássio, K – aerossóis e rochas (intemperismo);

cálcio, Ca – aerossóis e rochas (intemperismo);

fósforo, P – rochas (intemperismo);

magnésio, Mg – aerossóis e rochas (intemperismo).

3. É a circulação de um elemento químico do ambiente aos organismos e destes novamente ao ambiente na forma de compostos inorgânicos.

4. Qual é o papel da água nos ciclos biogeoquímicos dos elementos?

A água é o principal meio responsável pela circulação dos elementos químicos entre o ambiente e os organismos devido à sua alta capacidade de formar soluções. A água pode ser comparada ao sangue, sendo ambos os principais responsáveis pela circulação dos elementos na Terra e no corpo de um animal respectivamente. Além do transporte de massa a água é o meio que permite a ocorrência de diversas reações químicas. Sua importância como solvente universal é amplamente reconhecida.

Aulas 3 e 4

1. A Terra apresenta um raio de aproximadamente 6370 Km e é composta internamente por diversas camadas que se diferem pelas propriedades físicas e químicas dos elementos de que são formadas. Do interior para a superfície da Terra há primeiramente um núcleo interno sólido, ocorrendo entre 6370 e 5150 Km e é composto principalmente por ferro. A parte externa do núcleo apresenta um comportamento fluido e ocorre entre 5150 e 2891 Km de profundidade. A densidade média do núcleo é estimada em 12.2 g/cm^3 . Acima dele está o manto, de composição intermediária, com uma densidade entre 3,3 e $4,7 \text{ g/cm}^3$, situado em profundidades entre 2891 e 40 Km. O manto pode ser dividido em manto inferior e manto superior. Como camada mais externa temos a crosta, de densidade mais leve (2.7 a 2.95 g/cm^3) e mais fina, com cerca de 40 km de espessura; esta pode ser dividida em crosta superior e crosta inferior.

2. Composição química, densidade, temperatura, comportamento físico (validada pela passagem das ondas sísmicas).

3. Diversas ciências como a Geoquímica, a Geofísica e a Astronomia mostram evidências da estruturação da Terra em camadas. A Geoquímica, estudando a composição dos meteoritos, concluiu que os mesmos podem ser de diferentes tipos, correspondendo à fragmentação de corpos celestes diferenciados como a Terra em crosta, manto e núcleo ou ainda semelhantes à composição que a Terra teria caso não houvesse ocorrido diferenciação. A Geofísica permitiu conhecer a natureza, a profundidade e a espessura de cada parte do interior do planeta, através do estudo das velocidades de propagação das ondas sísmicas nos diversos meios e do estudo dos tipos de ondas de propagação (ondas S não se propagam em meio líquido, ondas P se propagam em meio líquido e sólido).

Cada mudança de velocidade das ondas sísmicas corresponde a uma descontinuidade das propriedades físicas, indicando mudança de camada. A Astronomia colabora com a idéia de estruturação em camadas pois os dados obtidos por astrônomos sobre o diâmetro (através de GPS) e a massa (através da análise da influência gravitacional sobre a lua) do planeta permitem calcular uma densidade de cerca de $5,5 \text{ g/cm}^3$. Sabendo-se que a densidade das rochas da crosta é de cerca de $2,8 \text{ g/cm}^3$, pode-se considerar que a densidade da Terra não é homogênea e que as regiões mais profundas (manto e núcleo) devem possuir uma densidade mais elevada para que se alcance a densidade média calculada pelos astrônomos.

4. A formação da Terra teve início com a acreção de planetesimais, que através da colisão e aglutinação, foram formando massas maiores. Os constantes choques e atrito, a energia gerada pela compressão gravitacional no interior no planeta, e o decaimento radioativo de átomos (U, Th, K) levaram ao aquecimento do planeta e fusão dos seus constituintes. O ferro, por ser mais pesado que os outros elementos, deslocou-se para o centro do planeta, enquanto que os materiais mais leves se deslocaram para regiões mais próximas da superfície (catástrofe do ferro). Como resultado, a Terra apresenta um zoneamento em camadas de composição e propriedades físicas diferenciadas.

5. A espessura da crosta, que é de aproximadamente 40 km, representa menos de 1% do total do diâmetro da Terra (6.370 km). Comparando-se a Terra a um ovo de galinha, a crosta da Terra é menos espessa do que a casca do ovo.

Aulas 5 e 6

1. Os Montes Apalaches e os Alpes Escandinavos estariam unidos formando um alinhamento montanhoso único.

2. O Pangéia era um supercontinente formado pela união de todos os continentes existentes (pan = todo, geo = terra). A sua lenta e contínua fragmentação e separação, há cerca de 200 milhões de anos, deu origem à atual configuração dos continentes.

3. A presença de grandes dobras, que são formadas nas regiões de choque entre placas, indica áreas da crosta onde ocorre compressão (convergência), dando origem a montanhas. Também a presença de regiões oceânicas com grandes profundidades (trincheiras, fossas ou zonas de subducção) nas margens de alguns continentes, assim como vulcões nas áreas emersas, mostram a ocorrência de choque e consumo de placas tectônicas.

Feições como fendas e vales tectônicos sugerem a ocorrência de rachaduras decorrentes de um processo de expansão, em que partes da crosta estariam se separando (divergência).

A semelhança entre o contorno dos continentes, a correspondência entre as rochas nas margens dos continentes (como cadeias de montanhas), a semelhança no registro fóssil e a presença da cordilheira meso-oceânica (cadeia de montanhas formadas por adição de material ígneo provindo do manto, onde ocorre a expansão do assoalho oceânico) indicam a existência de um sistema de afastamento entre regiões da crosta terrestre.

Grandes falhas que apresentam um movimento lento e contínuo (ex: Falha de Saint Andreas) sugerem a ocorrência de grandes esforços tectônicos em algumas regiões da crosta.

4. Os oceanógrafos descobriram que o assoalho oceânico é constituído por bandas alternadas, com polaridades normal e reversa. Devido a essas bandas estarem dispostas simetricamente, ou seja, aparecerem paralelamente dos dois lados da Cordilheira Meso-Atlântica, descobriu-se a existência de um mecanismo de expansão do assoalho oceânico a partir da cordilheira, em que as novas rochas formadas pela adição de magma oriundo do manto empurrariam as bandas (rochas) formadas anteriormente (já magnetizadas) e, ao resfriarem-se, os seus minerais adquiririam uma polaridade cuja orientação era definida segundo o campo magnético terrestre atuante na época de sua cristalização.

5. De 1 a 10 cm por ano.

6. Não. Desde 1500, a distância aumentou apenas cerca de 25 m (se considerarmos um deslocamento médio de 5 cm por ano).

$5 \text{ cm/ano} \times 500 \text{ anos} = 2500 \text{ cm} = 25 \text{ m}$

7. A hipótese de contração não explicava a forma e a posição dos continentes, assim como a semelhança entre o contorno dos continentes e a presença de feições como fendas e vales de origem tectônica, os quais sugeriam que estava ocorrendo um afastamento relativo de porções da crosta.

A hipótese de expansão do planeta não explicava a ocorrência de dobras em cadeias de montanhas, uma feição que indicava que havia uma contração da crosta.

Aulas 7 e 8

1. Elementos químicos são as unidades mais fundamentais nas quais a matéria pode ser separada por meios químicos comuns, ou seja, envolvendo energias inferiores às das reações nucleares.

Minerais são substâncias sólidas, formadas por processos inorgânicos naturais, que apresentam uma composição química específica e estrutura cristalina definida.

Rochas são agregados de minerais formados naturalmente.

2. Para uma substância ser considerada um mineral, ela deve ter sido formada naturalmente, ter sido formada por processos inorgânicos, apresentar composição química específica e estrutura cristalina característica.

3. No diamante, os átomos de carbono são unidos por ligações covalentes que possuem uma elevada força de ligação em um arranjo tridimensional, constituindo uma estrutura cristalina que confere ao mineral uma grande dureza, translúcido e com intenso brilho adamantino. Enquanto que na grafita os átomos de carbono são unidos por ligações covalentes em arranjo bidimensional, isto é formando placas, as quais se unem por ligações de Van der Waals, mais fracas, gerando um arranjo geométrico diferente do anterior e produzindo um mineral de baixa dureza, opaco, de cor escura e brilho metálico.

4. As rochas são classificadas em três grandes grupos: ígneas ou magmáticas, sedimentares e metamórficas.

As rochas ígneas são formadas pelo resfriamento e consolidação do magma.

As rochas sedimentares são formadas quando, após a deposição das partículas detriticas ou de origem química ou biológica, ocorre a consolidação dos sedimentos através do processo de diagênese (compactação e cimentação).

As rochas metamórficas são formadas pela recristalização, no estado sólido, de rochas pré-existentes, através da atuação de elevadas temperaturas e altas pressões, sem chegar ao ponto de anatexia (fusão).

5. Não, há rochas que se formam por processos que não são exatamente iguais aos do esquema. Por exemplo, algumas rochas ígneas nunca foram rochas metamórficas, pois foram formadas pela cristalização de magma provindo diretamente do manto, como aquelas que formam a cadeia meso-atlântica. Também, algumas rochas sedimentares podem ter sido geradas pelo acúmulo de sedimentos derivados da erosão de rochas ígneas e/ou metamórficas (podendo também ter tido as duas rochas como fontes de sedimentos, ao mesmo tempo), ou ainda pela erosão de outras rochas sedimentares. As rochas sedimentares também podem ser transformadas em sedimentos que podem sofrer processos diagenéticos e voltar a ser uma rocha sedimentar.

Uma rocha pode se formar após apenas algumas etapas do ciclo, como por exemplo uma rocha ígnea se formando somente através do resfriamento e cristalização do magma.

Dependendo do ciclo que foi desenhado poderia ou não haver outras setas. O que deve-se sempre levar em consideração é o fato do ciclo das rochas ser dinâmico e a interdependência dos seus componentes.

Aulas 9 e 10

1. O intemperismo físico consiste da fragmentação mecânica das rochas e o intemperismo químico envolve a decomposição química dos minerais constituintes das rochas.

2. O clima relaciona-se à intensidade das chuvas e à temperatura de uma determinada região. Quanto mais altas são as temperaturas e a incidência de chuvas, maiores são também as taxas de intemperismo. Além disso, o clima está relacionado com a presença de microorganismos e vegetação, que afetam diretamente o intemperismo químico e biológico.

3. O CO_2 da atmosfera é dissolvido pela água das chuvas, que se tornam uma solução diluída de ácido carbônico. O contato das águas pluviais com as rochas causa a decomposição química dos minerais constituintes das mesmas.

A incorporação do dióxido de carbono produzido pela decomposição da matéria orgânica, presente sobre os solos, também contribui para acidificar ainda mais as águas das chuvas.

4. A decomposição do feldspato produz um argilomineral (caulinita) e outras substâncias dissolvidas na solução (íon sódio, íon bicarbonato e sílica dissolvida) que podem ser lixiviados e transportados para os rios.

5. O termo argila se refere às partículas sedimentares com granulometria menor que 0,002 mm, enquanto que argilominerais são minerais formados na superfície terrestre, durante a decomposição de minerais preexistentes, e que se apresentam com um tamanho muito pequeno (menor que 0,002 mm - fração argila).

6. Os solos apresentam três horizontes principais:

Horizonte A: camada mais superficial, caracterizada pela presença de matéria orgânica (atribuindo muitas vezes uma cor escura), com alta atividade biológica (raízes), e alta taxa de lixiviação, devido à dissolução de substâncias e remoção de argilas devido à percolação das águas (iluviação), o que pode torná-lo arenoso. Pode também ser denominado "horizonte 0".

Horizonte B: camada do subsolo mais argilosa do que o horizonte A, em geral de cor marrom ou vermelha, com poucas raízes.

Horizonte C: camada mais profunda, formada pela rocha original parcialmente decomposta. Não apresenta atividade biológica.

Aulas 11 e 12

1. Os principais tipos de sedimentos são: 1) detríticos, 2) de origem química; e 3) de origem biológica. Os sedimentos detríticos são fragmentos de rochas originais e de novos minerais formados por intemperismo químico, formados fora do local de sedimentação. Os de origem química são formados perto ou no local de sedimentação por precipitação química através da reação entre substâncias dissolvidas. Os sedimentos de origem biológica são compostos por restos de matéria orgânica.

2. Através da análise da granulometria, de acordo com o tamanho das partículas, da mesma forma que os solos.

3. Através da reação química entre substâncias dissolvidas, provenientes da decomposição das rochas, formando partículas sólidas que se depositam.

4. Diagênese é o conjunto de processos responsáveis pela transformação de sedimentos inconsolidados em rochas sedimentares. Com a acumulação de sedimentos trazidos pela erosão em uma determinada região, esses ao se acumularem uns sobre os outros sofrem alterações de temperatura e pressão gerando um processo de compactação, em que o volume diminui e a densidade aumenta. A água que sobra desta compactação reage com os minerais formando outros. Estes novos minerais atuam como uma espécie de cimento, colando os grãos uns aos outros e diminuindo a porosidade, resultando na formação de uma rocha sedimentar.

5. Lagos de água doce (continental - depósitos de evaporitos e carbonatos) e a parte mais rasa dos mares chamada plataforma continental (marinho – carbonatos).

6. É uma extensa área de pelo menos 10.000 km² onde ocorre subsidência, isto é, a porção da crosta “afunda” através do acúmulo de camadas de sedimentos e também por movimentos tectônicos, permitindo a acumulação de espessas camadas de sedimentos.

Aulas 13 e 14

1. Após a deposição, a matéria orgânica sedimentar entra em processo de decomposição (principalmente as partes moles), alterando a composição química das águas intersticiais, consumindo o oxigênio dissolvido, e enriquecendo-as em nutrientes e gás carbônico (o qual irá formar o ácido carbônico). Após o consumo do oxigênio dissolvido, a decomposição da matéria orgânica continua, porém com menor eficiência. Quanto maior for a velocidade de deposição sedimentar, menor é o tempo que a matéria orgânica permanece em contato com o oxigênio, e sua preservação é favorecida.

2. A matéria orgânica sedimentar em decomposição altera a composição química das águas intersticiais, consumindo o oxigênio dissolvido, e enriquecendo-as em nutrientes e dióxido de carbono. A produção de CO₂ resulta na formação de ácido carbônico, o que torna as águas intersticiais acidificadas.

3. Os fósseis podem ser divididos em restos (fósseis constituídos por partes de organismos) e vestígios (evidências da presença ou atividade de organismos).

4. As partes moles são raramente preservadas, podendo ocorrer em situações de rápido soterramento, em regiões de águas subterrâneas ricas em cálcio que neutralizam a acidez das águas intersticiais, em casos de mumificação através de aprisionamento em resinas de árvores, por congelamento em regiões de clima glacial, por rápida desidratação em regiões desérticas e por substituição por minerais formados durante a diagênese (carbonatos, sulfetos e fosfatos).

5. As partes duras (conchas, carapaças, dentes e ossos) são constituídas por substâncias como carbonato de cálcio (calcita e aragonita), sílica e fosfato de cálcio, que podem ser mais facilmente preservadas. Processos como a recristalização, incrustação, permineralização e carbonificação são importantes para que ocorra essa preservação. A recristalização consiste na transformação de um mineral em outro sem alteração da sua composição química (ex.: aragonita para calcita). A incrustação ocorre quando há cristalização de minerais na superfície de um organismo, revestindo-a por completo. Na permineralização, os poros das partes duras dos organismos, como troncos de árvores, são preenchidos por minerais. A carbonificação ocorre quando os elementos voláteis da matéria orgânica (oxigênio, hidrogênio e nitrogênio) são liberados, restando uma película de carbono.

6. Pegadas – são formadas quando animais de médio e grande porte caminham sobre um substrato deformável, geralmente lamoso.

Perfurações – produzidas por organismos bentônicos que vivem na interface sedimento/água.

7. Os fósseis são mais facilmente encontrados em rochas sedimentares, uma vez que estas rochas são formadas na superfície terrestre, em condições de baixa temperatura e pressão, o que favorece a preservação.

1. São transformações que ocorrem em isótopos, cujos núcleos não são estáveis e se desintegram espontaneamente, formando um átomo de um elemento diferente ou igual, emitindo radiação.

2. O carbono-14 é usado para datar materiais orgânicos (conchas, madeiras) presentes em sedimentos com, no máximo, 70 mil anos.

3.

| ERAS | INÍCIO (Ma) |
|------------|-------------|
| Cenozóica | 65 |
| Mesozóica | 248 |
| Paleozóica | 570 |

4.

| |
|-------------------|
| C |
| derrame basáltico |
| B |
| A |

A datação utilizada para determinar a idade do basalto é chamada de **datação absoluta**, e é feita com base em isótopos instáveis e seu decaimento radioativo. A datação das outras camadas foi feita pela chamada **datação relativa**, através da comparação entre as idades dos estratos.

Os fósseis presentes na rocha C apresentam uma idade inferior a 150 milhões de anos, pois são mais jovens do que o basalto e aqueles presentes nas camadas A e B têm idade superior a 150 milhões de anos, pois são mais antigos que o basalto.

5. A idade de materiais orgânicos (fósseis) só pode ser obtida, por datação absoluta de carbono-14, até a idade de 70 mil anos. Dessa forma, a obtenção da idade de fósseis mais antigos é possível através da datação relativa, através da comparação com a idade de rochas ígneas (datação absoluta) que estejam envolvidas na história deposicional da bacia sedimentar, seja na forma de um derrame basáltico, ou nas rochas que compõem o embasamento primordial.

1. Não foi possível um registro contínuo dos seres vivos ao longo do tempo geológico, pois este apresenta eventos erosivos ou tectônicos, que resultaram na perda de muitas informações. Desta forma, os sedimentos depositados durante os Éons Arqueano e Proterozóico já passaram por vários ciclos de tectonismo e metamorfismo, o que fez com que o registro paleontológico correspondente ficasse muito danificado ou totalmente destruído. Além disso, organismos constituídos apenas por partes moles são facilmente destruídos logo após a deposição sedimentar, sendo difícil a sua preservação.

2. O Pré-Cambriano corresponde aos Éons Proterozóico, Arqueano e Hadeano, que são representados por rochas formadas antes de 570 milhões de anos atrás. Os registros de vida Pré-Cambriana são representados pela “Fauna de Ediacara” (celerados e anelídeos) e por secreções produzidas por organismos semelhantes às que são formadas atualmente por algas cianofíceas em regiões marinhas tropicais. Acredita-se que a atmosfera primitiva era pobre em oxigênio, sendo desfavorável à existência de animais.

3. Os estromatólitos são estruturas formadas por secreções produzidas por algas cianofíceas. Podem ser observados em rochas muito antigas com até cerca de 2 bilhões de anos. Uma vez que não é conhecido nenhum processo inorgânico capaz de produzir estruturas semelhantes, acredita-se que estas algas já existiam desde o Pré-Cambriano. Além disso, podemos concluir que nem todos os organismos primitivos existentes desde o Pré-Cambriano foram extintos ao longo do tempo geológico.

4. O Período Cambriano é marcado por uma grande “explosão” das formas de vida, apresentando fósseis de animais já bastante evoluídos.

5. O Éon Fanerozóico teve início há 570 milhões de anos e está dividido nas Eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica.

6. A transição para o continente é pouco documentada no registro fóssilífero, pois provavelmente as formas de transição não possuíam estruturas calcificadas nem tecidos de celulose. Provavelmente esta transição se deu no início da Era Paleozóica.

7. As algas verdes desenvolveram um sistema radicular para retirar água e nutrientes da água e do solo, folhas para a fotossíntese e um sistema vascular para o transporte da água e dos nutrientes da raiz para as folhas.

8. A presença das partes duras dos esqueletos dos vertebrados favoreceu a sua preservação no ambiente terrestre, ao contrário dos invertebrados que, pela ausência de partes duras, estavam mais suscetíveis aos processos de degradação.

9. Os répteis surgiram no final da Era Paleozóica (Permiano – 290 M.a.). Os mamíferos surgiram no Triássico (248 M.a.).

10. Na Era Cenozóica.

11. Os primatas surgiram no início da Era Cenozóica. O homem surgiu no Pleistoceno.

12. Bacia sedimentar é uma extensa depressão no relevo, que constitui um local onde os sedimentos se depositam naturalmente pela ação da gravidade.

13. Porque ao longo do tempo geológico tem-se a predominância das variações climáticas e eustáticas (nível do mar) que definem o tipo de ambiente em que está ocorrendo a sedimentação e os processos neles atuantes.

14. Ambos não existiam.

15. Acredita-se que tenha sido o Pantalassa, o grande e único oceano existente naquela época. Uma vez que a Cordilheira dos Andes não existia, e nem o Oceano Atlântico, provavelmente as águas oceânicas entraram no continente vindo da direção onde hoje se situa a Cordilheira dos Andes.

Aulas 19 e 20

Este exercício deve ser conferido tomando-se por base a Figura 3 das aulas 19 e 20. Observe que em uma plantação de cana-de-açúcar muitas vezes existe uma entrada adicional de água devido à irrigação.

Aulas 21 e 22

1. Há dois grandes grupos de fontes de aerossóis para a atmosfera: continental e marinha. A fonte continental inclui solos e vegetação, enquanto a fonte marinha é formada unicamente pelo “spray” originado do oceano (maresia).

Dentre as fontes continentais podemos inserir as emissões gasosas de áreas alagadas que liberam para a atmosfera gases de enxofre e nitrogênio originados de processos naturais, tais como **desnitrificação** (processo natural mediado por bactérias que produz compostos gasosos de nitrogênio a partir da decomposição da matéria orgânica) e **sulfato-redução** (processo natural mediado por bactérias que produz compostos gasosos de enxofre a partir da decomposição da matéria orgânica).

A “assinatura química” de uma fonte continental de aerossóis é constituída dentre outros por NO_3^- e NH_4^+ . A “assinatura química” da fonte marinha é representada principalmente por Cl, Na, Mg, como podemos observar na Tabela 1 das Aulas 21 e 22. Notar que os solos são uma fonte importante de aerossóis para a atmosfera, mas vários elementos abundantes nesta geosfera, tais como Al e Fe, são pouco solúveis em água, não estando presente em grandes quantidades dissolvidos nas águas pluviais.

2. Não. As fontes atuantes nos dois municípios são similares, tendo grande influência de fontes marinhas devido à sua proximidade com o mar, o que torna a composição química das águas pluviais muito parecidas nestas regiões.

3. Por mais diluída que seja, a água da chuva natural (não poluída) não é água pura. A interação entre a água da chuva e o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera torna a chuva naturalmente ácida, com um pH de aproximadamente 5,7. Isto ocorre pela reação do CO_2 com H_2O , que resulta na formação do ácido carbônico (H_2CO_3), que por sua vez se dissocia parcialmente produzindo íons hidrogênio (H^+) e bicarbonato (HCO_3^-). Ainda pode ocorrer chuva naturalmente ácida com pH abaixo de 5,7 quando existe uma fonte natural de compostos de enxofre, por exemplo, SO_x de origem vulcânica, que reage com a água e forma ácidos sulfúrico (H_2SO_4).

4. Apesar da sua baixa concentração na atmosfera (0,036%), o dióxido de carbono (CO_2) é o quarto gás mais abundante na atmosfera, sendo muito importante por ser uma fonte de carbono para fotossíntese das plantas e para a absorção da radiação infravermelha liberada pela Terra e irradiando-a de volta para a superfície, ajudando a manter a temperatura do planeta – o efeito estufa.

Ondas curtas provindas do sol alcançam a Terra. Cerca de 30% dessa radiação solar incidente é refletida de volta para o espaço pelas nuvens e oceanos. O restante dessa radiação (70 %) é absorvida pelos oceanos, atmosfera, continentes e biosfera e se transforma em calor, exceto a utilizada na fotossíntese. Parte desta energia é irradiada de volta para o espaço na forma de radiação infravermelha de longo comprimento de onda a partir da superfície terrestre. Uma parte desta energia é absorvida pelos gases atmosféricos, que como resultado retêm a energia nas partes baixas da atmosfera, causando um aumento na temperatura na superfície do planeta. Sem este mecanismo regulador, a superfície da Terra seria um local impróprio para vida, pois este processo mantém a temperatura amena na superfície da Terra. Porém a emissão antrópica de CO_2 e outros gases do efeito estufa, como o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), vem acentuando a intensidade deste processo natural, resultando em um aumento do aquecimento global. As principais fontes antrópicas são a queima de combustíveis fósseis (carvão e petróleo), e o desmatamento ocasionado pela expansão das áreas agrícolas.

5. Algumas atividades antrópicas que devem estar contribuindo para a ocorrência da chuva ácida e o aumento do efeito estufa são:

- Queimadas nas monoculturas de cana-de-açúcar para a execução da colheita.
- Queima de gases de hidrocarbonetos nas plataformas de produção de petróleo e gás natural e nas refinarias.
- Queima de madeira em fornos de olarias, para a produção de telhas e tijolos.
- Emissão de CO_2 na atmosfera pelos automóveis e de SO_4 pelas indústrias nas grandes cidades.
- Emissões gasosas de termelétricas.
- Poluição de mangues e brejos por esgotos domésticos, aumentando a quantidade de matéria orgânica a ser decomposta nestes ambientes e ainda causando a morte de animais e vegetais. A decomposição mais intensa resultará na produção de gases de nitrogênio e enxofre.

1. Bacia de drenagem é a área de captação de água para um determinado corpo hídrico. É uma porção de terreno delimitada topograficamente por serras ou morros (divisores de água), onde toda a água da chuva que cai migra através do escoamento superficial e subsuperficial em direção a parte baixa do terreno, formando um rio ou um lago.

2. O lençol freático é uma zona saturada que abastece o rio, principalmente quando não está chovendo, através de um fluxo lateral lento ao longo das encostas em direção ao canal fluvial. Quando a zona saturada aflora na superfície do terreno no fundo do vale, há a formação de um rio, ou seja, o rio é um afloramento do lençol freático, assim como são as lagoas e os brejos.

3. Quando alcança o lençol freático próximo ao contato solo-rocha a água de infiltração vai participar do processo de intemperismo dos minerais primários presentes nas rochas. Esse processo tende a liberar uma série de elementos e compostos dissolvidos (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , H_4SiO_4 e HCO_3^-) que são incorporados ao lençol freático. Exemplo: uma rocha ígnea, metamórfica, ou sedimentar (carbonatito, mármore, ou calcário, respectivamente) rica em minerais de carbonato de cálcio (calcita e dolomita) tendem a liberar cálcio (Ca^{+2}), carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$) e bicarbonatos (HCO_3^-). Já rochas ricas em minerais de ferro (biotita), magnésio e enxofre (pirita) tendem a ser rapidamente decompostos e liberar os respectivos elementos.

4. Sim. A composição química das águas do lençol freático é reflexo dos componentes da paisagem, dentre eles, chuva, uso do solo, tipo de solo e tipo de rocha. No exemplo citado a composição química da chuva é diferente entre os locais, com a fonte marinha dominando em Angra dos Reis e a fonte continental sendo majoritária em Nova Friburgo. Estas características distintas já são suficientes para conferir uma diferença na composição química do lençol freático dentre as duas áreas.

5. Áreas que foram intensamente urbanizadas sem um planejamento de sistemas de esgoto, que apresentam grande número de fossas sépticas, além de aterros sanitários, podem causar contaminação bacteriológica do lençol freático, por

coliformes fecais e totais. Além disso, introduzem nas águas de lençol freático compostos de carbono, nitrogênio e fósforo que podem tornar a água imprópria para consumo humano.

A utilização de terras para a agricultura em que são aplicados fertilizantes químicos, os quais liberam compostos de nitrogênio (NO_3^- , NH_4^+), fósforo (PO_4^{3-}) e potássio (K^+) que podem tornar a água imprópria para consumo humano sem tratamento prévio.

6. As chamadas fossas sépticas são grandes agentes de contaminação do lençol freático. Mesmo em residências que apresentam rede de tratamento de esgoto (esgoto encanado) é muito comum haver vazamentos nas tubulações que, muitas vezes, são desconhecidos e difíceis de serem detectados. Pode também estar havendo contaminação nas residências que possuem pomares e hortas que são tratados com pesticidas e adubos industrializados.

Aulas 25 e 26

1.

- Material Particulado em Suspensão Inorgânico: os elementos maiores que compõem estas partículas são Al, Fe, Si, Ca, K, Mg e Na – em sua maioria argilominerais.
- Material Particulado em Suspensão Orgânico: elementos mais abundantes nestas partículas são C, N e P – fitoplâncton, zooplâncton e restos de material orgânico.
- Elementos e Compostos Maiores Dissolvidos: Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- e H_4SiO_4 . Estes podem ainda ser divididos em: elementos sem fase gasosa na atmosfera (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , H_4SiO_4) e elementos com fase gasosa na atmosfera (SO_4^{-2} e HCO_3^-) que têm como fontes gases atmosféricos (SO_2 e CO_2 , respectivamente) além do intemperismo de rochas.
- Nutrientes Dissolvidos – N e P – nas formas orgânica e inorgânica cuja fonte provém da interação da água com a biosfera.
- Metais Pesados Particulados e Dissolvidos – Zn e Cu, por exemplo.

2. A sílica (H_4SiO_4) é incorporada às águas de infiltração através do intemperismo sendo então transportada para o canal fluvial. Porém, a água da chuva percorre diferentes caminhos na superfície dos continentes até o canal fluvial. Quando não está chovendo, o canal fluvial é abastecido pelo lençol freático da sua bacia

de drenagem, e as águas fluviais apresentarão níveis relativamente mais altos de conteúdo de sílica. Entretanto, a composição química das águas fluviais se modifica durante as chuvas pois somam-se os outros fluxos (escoamento superficial e subsuperficial) que refletem o baixo conteúdo de sílica dos compartimentos atravessados (dossel, serrapilheira e a porção superior do solo). Sendo assim, quando esta água alcança o canal fluvial, a vazão do rio aumenta e a concentração de sílica diminui, devido a uma maior diluição da sílica nas águas.

O nitrogênio é abundante na biosfera, podendo ocorrer nos rios sob a forma particulada orgânica (fitoplâncton, zooplâncton e restos de material orgânico) e dissolvida (orgânica – NOD – e inorgânica – NO_3^- , NO_2^- e NH_4^+). Portanto, quando ocorre um aumento da vazão do rio durante o verão, é esperado também um aumento do conteúdo de nitrogênio nas águas fluviais, pois as águas provenientes do escoamento superficial promovem a maior interação da cobertura vegetal com a água da chuva, liberando os compostos nitrogenados que são transportados para o canal fluvial.

3. Em uma bacia de drenagem, a fonte predominante da água presente dentro do canal fluvial é o lençol freático (afloramento do lençol freático). As outras fontes de água para o canal fluvial são aquelas provindas de chuvas, que ocorrem esporadicamente (escoamento superficial e subsuperficial, e chuva que cai diretamente no canal). Portanto, com relação aos elementos maiores dissolvidos na água tais como sódio (Na^+), cloreto (Cl^-), potássio (K^+) e magnésio (Mg^{2+}), as águas do lençol freático e dos rios não apresentam diferenças marcantes, pois as fontes principais desses elementos são as mesmas: a chuva, o uso do solo, o tipo de solo e de rocha.

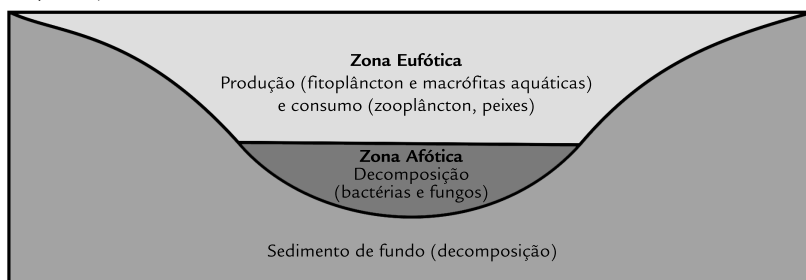
4. Porque além do tamanho da bacia de drenagem, outros fatores influenciam na quantidade de partículas que um rio transporta para o mar, como o relevo da bacia, a geologia, o clima, a ação antrópica e a vazão do rio. Os rios que percorrem áreas com maiores declives apresentam maiores velocidades de corrente, e, conseqüentemente, maior capacidade de transportar partículas. As ações humanas nas bacias de drenagem através de desmatamento, agricultura e construção de barragens afetam drasticamente a quantidade de partículas que um rio transporta. Um dos grandes problemas enfrentados nos dias de hoje é a diminuição de vazão dos rios proporcionada pelo assoreamento, que é resultado da ação antrópica desordenada na bacia de drenagem.

5. O lançamento de esgotos domésticos “in natura” nos canais fluviais pode ser medido através da análise de elementos associados com a matéria orgânica (nitrogênio e fósforo, por exemplo).

6.

Produção (algas e
macrófitas aquáticas)

Produção (algas e
macrófitas aquáticas)



7. Na água da superfície a fotossíntese realizada pelos produtores primários retira da água nutrientes (incluindo o fosfato) e CO_2 , e libera O_2 . Por outro lado, na água do fundo (situada fora da zona eufótica) organismos decompositores que oxidam a matéria orgânica utilizando o oxigênio dissolvido na água e liberando nutrientes e dióxido de carbono. Assim, as águas de superfície são empobrecidas em nutrientes e com maior conteúdo de O_2 quando comparadas com as águas de fundo.

1. Estuário pode ser definido como um corpo aquoso litorâneo de circulação mais ou menos restrita ligado a oceano aberto (baías e lagunas), formado pelo encontro e mistura das águas fluviais com a água do mar, em proporções variadas. Representa um ambiente de transição entre o continente e o mar e apresenta características físicas, químicas e biológicas típicas devido à mistura de água doce e salgada.

2. Os principais fatores/processos físicos que podem dar origem a um estuário do tipo cunha salina são a baixa vazão do rio, a subida da maré e a entrada de água salgada (mais densa) pelo fundo do canal.

3. O nitrato e o amônio são elementos cuja concentração é maior na água dos rios do que no mar. Assim quando a água do rio, rica em nitrato e amônio, entra no estuário e começa a se misturar com a água do mar, ocorre uma diminuição progressiva do conteúdo de ambos os compostos na água estuarina, ao longo do gradiente de salinidade (do rio em direção ao mar), devido à diluição. Como o nitrato e o amônio são elementos essenciais para a biosfera, esta situação é

modificada pois suas concentrações nas águas estuarinas vão ser afetadas, não só pela mistura das águas do rio e do mar, mas também por processos biológicos (produção e decomposição), ou seja, a sua variação de concentração ao longo do gradiente de salinidade não mais segue uma linha reta. Por exemplo, quando o fitoplâncton estuarino retira o nitrato dissolvido da água para produção de biomassa, a concentração na água fica menor do que a esperada só pela mistura, e a sua variação ao longo do estuário vai seguir uma linha curva (como no caso da curva inferior do gráfico da Figura 4a, indicando remoção da solução por processos químicos ou biológicos). Neste caso os elementos apresentam um comportamento não-conservativo, pois sua variação de concentração ao longo do gradiente de salinidade é afetada tanto pela mistura física das águas, quanto por processos biológicos e químicos.

4. A constância na composição química dos elementos maiores em solução nos oceanos é devido principalmente ao fato deles estarem presentes em alta concentração e serem pouco utilizados pelos organismos, variando muito pouco sua concentração, podendo então ser considerados elementos conservativos. O padrão de circulação das correntes oceânicas, que tendem a homogeneizar as águas ao redor do planeta, também contribui para esta uniformidade da concentração de tais elementos ao longo do tempo.

5. Os processos metabólicos que ocorrem nos lagos (produção, consumo e decomposição), também estão presentes nos oceanos. Na zona eufótica a fotossíntese retira nutrientes da água e libera oxigênio. Abaixo da zona eufótica o processo de fotossíntese não ocorre, prevalecendo a decomposição da matéria orgânica pelas bactérias. Como a profundidade dos oceanos é alta (~5Km) quando comparado com os lagos (~100m), a maior parte da matéria orgânica é decomposta ainda na coluna d'água, antes de alcançar o sedimento de fundo. A decomposição libera nutrientes dissolvidos o que torna as águas subsuperficiais enriquecidas em relação a zona eufótica.

Em algumas áreas ocorrem condições favoráveis de correntes, ventos e geomorfologia, que dão origem a ressurgência, fenômeno caracterizado pela subida para dentro da zona eufótica das águas subsuperficiais ricas em nutrientes. Este aporte de nutrientes alimenta o fitoplâncton, aumentando significativamente a produtividade primária e, em consequência, atingindo outros níveis tróficos e aumentando a produtividade costeira em geral.

6. Sim. O fitoplâncton constitui o principal produtor primário dos oceanos, presente na zona eufótica. O fitoplâncton possui a clorofila em sua estrutura molecular, a qual, excitada pela luz solar, auxilia no processo de fotossíntese.

Aulas 27 e 28

1. Estuário pode ser definido como um corpo aquoso litorâneo de circulação mais ou menos restrita ligado a oceano aberto (baías e lagunas), formado pelo encontro e mistura das águas fluviais com a água do mar, em proporções variadas. Representa um ambiente de transição entre o continente e o mar e apresenta características físicas, químicas e biológicas típicas devido à mistura de água doce e salgada.

2. Os principais fatores/processos físicos que podem dar origem a um estuário do tipo cunha salina são a baixa vazão do rio, a subida da maré e a entrada de água salgada (mais densa) pelo fundo do canal.

3. O nitrato e o amônio são elementos cuja concentração é maior na água dos rios do que no mar. Assim quando a água do rio, rica em nitrato e amônio, entra no estuário e começa a se misturar com a água do mar, ocorre uma diminuição progressiva do conteúdo de ambos os compostos na água estuarina, ao longo do gradiente de salinidade (do rio em direção ao mar), devido à diluição. Como o nitrato e o amônio são elementos essenciais para a biosfera, esta situação é modificada pois suas concentrações nas águas estuarinas vão ser afetadas, não só pela mistura das águas do rio e do mar, mas também por processos biológicos (produção e decomposição), ou seja, a sua variação de concentração ao longo do gradiente de salinidade não mais segue uma linha reta. Por exemplo, quando o fitoplâncton estuarino retira o nitrato dissolvido da água para produção de biomassa, a concentração na água fica menor do que a esperada só pela mistura, e a sua variação ao longo do estuário vai seguir uma linha curva (como no caso da curva inferior do gráfico da Figura 4a, indicando remoção da solução por processos químicos ou biológicos). Neste caso os elementos apresentam um comportamento não-conservativo, pois sua variação de concentração ao longo do gradiente de salinidade é afetada tanto pela mistura física das águas, quanto por processos biológicos e químicos.

4. A constância na composição química dos elementos maiores em solução nos oceanos é devido principalmente ao fato deles estarem presentes em alta concentração e serem pouco utilizados pelos organismos, variando muito pouco sua concentração, podendo então ser considerados elementos conservativos. O padrão de circulação das correntes oceânicas, que tendem a homogeneizar as águas ao redor do planeta, também contribui para esta uniformidade da concentração de tais elementos ao longo do tempo.

5. Os processos metabólicos que ocorrem nos lagos (produção, consumo e decomposição), também estão presentes nos oceanos. Na zona eufótica a fotossíntese retira nutrientes da água e libera oxigênio. Abaixo da zona eufótica o processo de fotossíntese não ocorre, prevalecendo a decomposição da matéria orgânica pelas bactérias. Como a profundidade dos oceanos é alta (~5Km) quando comparado com os lagos (~100m), a maior parte da matéria orgânica é decomposta ainda na coluna d'água, antes de alcançar o sedimento de fundo. A decomposição libera nutrientes dissolvidos o que torna as águas subsuperficiais enriquecidas em relação a zona eufótica.

Em algumas áreas ocorrem condições favoráveis de correntes, ventos e geomorfologia, que dão origem a ressurgência, fenômeno caracterizado pela subida para dentro da zona eufótica das águas subsuperficiais ricas em nutrientes. Este aporte de nutrientes alimenta o fitoplâncton, aumentando significativamente a produtividade primária e, em consequência, atingindo outros níveis tróficos e aumentando a produtividade costeira em geral.

6. Sim. O fitoplâncton constitui o principal produtor primário dos oceanos, presente na zona eufótica. O fitoplâncton possui a clorofila em sua estrutura molecular, a qual, excitada pela luz solar, auxilia no processo de fotossíntese.

1. A energia solar que atinge a Terra é em parte refletida de volta ao espaço pelas nuvens e pela superfície terrestre na forma de radiação de pequeno comprimento de onda. Outra parte dessa energia é utilizada na fotossíntese. O restante é absorvido pela superfície dos continentes e oceanos, sendo parcialmente irradiada a partir destas superfícies na forma de radiação infravermelha (de longo comprimento de onda). Esta radiação de longo comprimento de onda é absorvida pelo vapor d'água, poeira, ozônio, dióxido de carbono e pelas nuvens presentes na atmosfera, mantendo a temperatura amena.

2. Porque a forma aproximadamente esférica do planeta causa variação na intensidade de energia solar que alcança a superfície, através da mudança no ângulo com que os raios solares atingem a superfície entre o Equador e os pólos. A diferença entre a radiação solar recebida e a emitida de volta para o espaço, em diferentes latitudes, resulta em um padrão de circulação atmosférica e oceânica onde a transferência de calor das latitudes tropicais para as latitudes temperadas e polares ocorre por: 1) correntes oceânicas que transportam águas mornas; 2) ventos que transportam massas de ar aquecidas; e 3) transporte de calor latente na forma de vapor d'água.

3. As massas de ar que sobem no Equador atingem camadas mais altas da atmosfera, onde ocorre a condensação do vapor, resultando em chuvas intensas. Essas massas de ar migram em direção a latitudes mais altas e no caminho o ar se resfria e desce gradualmente em direção à superfície terrestre, próximo às latitudes de 30° Norte e 30° Sul. O ar resfriado e seco que desce é aquecido, absorve umidade e torna o céu limpo e o clima árido. Como exemplo, temos os desertos do Saara (África), Kalahari (África), Rub-al-Khali (Arábia Saudita) e o Grande Deserto da Austrália, que apresentam quantidades de chuvas anuais extremamente baixas (geralmente 25mm e até 5mm em alguns locais).

4. As correntes superficiais oceânicas giram no sentido anti-horário no hemisfério Sul devido ao Efeito de Coriolis e aos desvios causados pelo encontro das massas de água com os continentes.

5. Os ventos alísios se tornam fracos ou ainda invertem de direção, passando a fluir de Oeste para Leste. As zonas de pressão atmosférica também se invertem, formando-se uma zona de alta pressão próximo à Indonésia, e uma de baixa pressão próximo à América do Sul. Dessa forma as águas mornas se espalham pela zona tropical do Oceano Pacífico e quando chegam ao continente Sul-americano se espalham ao longo da costa, aumentando a evaporação do oceano, e conseqüentemente as chuvas, e impedindo a ressurgência.

6. Sim. Em regiões de clima seco, por exemplo, as chuvas fortes associadas com o El Niño podem criar alagados, que servem de ambiente ideal para reprodução de mosquitos. Por outro lado, em climas muito úmidos as secas originadas diminuem drasticamente a vazão dos rios, originando uma série de alagados, que também são propícios à reprodução dos mosquitos.

Aulas 1 e 2

BERNER, Elisabeth K.; BERNER, Robert A. *Global Environment: water, air and geochemical cycles*. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 376p. Cap. 4: Chemical weathering and water chemistry.

ESTEVEZ, Francisco A. *Fundamentos de Limnologia*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602p. Cap. 4: O ciclo da água na biosfera.

RICKLEFS, Robert E. *A Economia da Natureza*. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996. 470p. Cap. 7: Os Caminhos dos Elementos no Ecossistema.

Aulas 3 e 4

GEOLOGY entrance. UCMP exhibit halls. Disponível em: <<http://www.ucmp.berkeley.edu/exhibit/geology.html>>. Acesso em: 25 maio 2005.

LEINZ, Victor; AMARAL, Sérgio E., *Geologia Geral*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1972. 487p.

MANAHAN, Stanlei E., *Environmental science and technology*. New York: Lewis Publishers, 1997. 898p.

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p.

MYERS, Norman. *Gaia: an atlas of planet management*. New York: Doubleday Anchor Books, 1993. 272p.

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p.

PRESS, Frank; SIEVER, Raymond. *Earth*. New York: W.H. Freeman and Company, 1974. 573p.

SLABAUGH, Wendell H.; PARSONS, Thera D. *Química Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1977.

Aulas 5 e 6

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today*: understanding our planet. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p.

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p.

PLATE Tectonics Animations. Disponível em: <<http://wrgis.wr.usgs.gov/docs/parks/animate/index.html>>. Acesso em: 25 maio 2005.

This dynamic earth. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html>>. Acesso em: 25 maio 2005.

Aulas 7 e 8

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today*: understanding our planet. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p.

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p.

Aulas 9 e 10

<http://www.eosc.osshe.edu/peers/lessons/soils>

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today*: understanding our planet. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p.

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p.

Aulas 11 e 12

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J., *Geology Today*: understanding our planet. New York: John Wiley & Sons, 1999. 527p.

POPP, José Henrique. *Geologia Geral*. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 376p.

Aulas 13 e 14

CARVALHO, Ismar S. *Paleontologia*. Rio de Janeiro: Interciência, 2000. Cap. 1, 2 e 3.

GEOPOR na escola. disponível em: <<http://www.geopor.pt/gne/ptgeol/fosseis/fosseis.html>>. Acesso em : 07 dez. 2004.

NOVA on line. Curse of T. rex. Disponível em: <<http://www.pbs.org/wgbh/nova/trex>>. Acesso em : 07 dez. 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/geociencias/paleo/fosseis.html>>. Acesso em : 07 dez. 2004.

Aulas 17 e 18

MCALESTER, Arcie Lee. *História geológica da vida*. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. 194p. (Série textos básicos de geociência).

UNIVERSITY OF CALIFORNIA. Museum of Paleontology. *Discover the history of life*. Disponível em : <<http://www.ucmp.berkeley.edu>>. Acesso em: 07 dez. 2004.

Aulas 19 e 20

FORTESCUE, John A.C. *Environmental geochemistry: a holistic approach*. New York: Springer-Verlag, 1980. (Ecological Studies; 35) .

PRESS, Frank; SIEVER, Raymond. *Understanding earth*. New York: W.H. Freeman and Co., 2000.

BERNER, Elizabeth Kay; BERNER, Robert A. *Global environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. Cap. 1, 2 e 3.

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J. *Geology today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999. Cap. 13 e 14.

THE AUSTRALIAN GREENHOUSE OFFICE. Disponível em: <www.greenhouse.gov.au>. Acesso em: 11 set. 2002.

THE GREEN LANE. ENVIRONMENT CANADA'S WORLD WIDE WEB SITE. Disponível em: <www.ec.gc.ca/acidrain>. Acesso em: 11 set. 2002.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Disponível em: <www.epa.gov/airmarket/acidrain/index.html>. Acesso em: 11 set. 2002.

BERNER, Elizabeth Kay; BERNER, Robert A. *Global environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. Cap. 4.

IBAMA On Line. Disponível em: <www.ibama.gov.br>. Acesso em: 11 set. 2002.

MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 12 set. 2002.

PRESS, Frank; SIEVER, Raymond. *Understanding earth*. New York: W.H. Freeman and Co., 2000. Cap. 12.

BERNER, Elizabeth Kay; BERNER, Robert A. *Global environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. Cap. 5.

ESTEVES, Francisco de Assis. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. Cap. 7.

Aulas 27 e 28

BERNER, Elizabeth Kay; BERNER, Robert A. *Global environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996.

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J. *Geology today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999.

Aulas 29 e 30

BERNER, Elizabeth Kay; BERNER, Robert A. *Global environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1996. Cap. 1.

MURCK, Barbara W.; SKINNER, Brian J. *Geology today: understanding our planet*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999. Cap. 13.

NATIONAL Oceanic and Atmospheric Administration. *What is an El Niño?* Disponível em: <<http://www.pmel.noaa.gov/tao/el-nino/el-nino-story.html>>. Acesso em: 23 out. 2002.

NATIONAL Oceanic and Atmospheric Administration. *Tropical Atmosphere Ocean Project*. Disponível em: <<http://www.pmel.noaa.gov/tao>>. Acesso em: 23 out. 2002.

ORGANIZAÇÃO Pan-Americana da Saúde (OPAS/OMS). Disponível em: <<http://www.opas.org.br/sistema/fotos/clima.htm>>. Acesso em: 22 out. 2002.

PRESS, Frank; SIEVER, Raymond. *Understanding earth*. New York: W.H. Freeman and Co., 2000. p. 553-555.

WORLD Health Organization. *Climate change and human health: impact and adaptation*. Disponível em: <http://www.who.int/environmental_information/Climate/climchange.pdf>. Acesso em: 23 out. 2002.

WORLD Health Organization. *El niño and its health impacts*. Fact Sheet, n. 192. Revised March, 2000. Disponível em: <<http://www.who.int/inf-fs/en/fact192.html>>. Acesso em: 23 out. 2002.

Serviço gráfico realizado em parceria com a Fundação Santa Cabrini por intermédio do gerenciamento laborativo e educacional da mão-de-obra de apenados do sistema prisional do Estado do Rio de Janeiro.



Maiores informações: www.santacabrini.rj.gov.br

ISBN 85-7648-177-4



9 788576 481775



UENF
Universidade Estadual
do Norte Fluminense



Universidade Federal Fluminense



**FUNDAÇÃO
SANTA CABRINI**
Provedora de acesso à Cidadania



FAPERJ
Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo
à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro



**GOVERNO DO
Rio de Janeiro**

SECRETARIA DE
CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Ministério
da Educação

