

# Ciclos biogeoquímicos

Na natureza, existe uma constante troca de substâncias contendo diversos elementos químicos, como carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, fósforo, cálcio e enxofre. Esses elementos são retirados do ambiente, utilizados pelos organismos e novamente devolvidos ao ambiente. Os principais responsáveis pelo processo de ciclagem dos nutrientes são as bactérias e os fungos decompositores, os quais possibilitam a degradação das moléculas orgânicas em compostos mais simples, que ficam disponíveis no ambiente para serem utilizados por outros seres vivos.

Todo esse trânsito de elementos químicos entre os seres vivos e o ambiente ocorre nos **ciclos biogeoquímicos**, que são essenciais para que os elementos químicos retornem ao ambiente e sejam utilizados por novos seres. Existem diversos desses ciclos na natureza, porém aqui serão abordados os principais: da água, do carbono, do oxigênio, do nitrogênio e do fósforo.

## Ciclo da água

A água é o composto inorgânico mais abundante nos seres vivos e em toda a biosfera. É encontrada na forma líquida nos oceanos, rios, lagos e subsolo; na forma sólida, constituindo o gelo dos círculos polares e geleiras; e na forma de vapor, formando a atmosfera. Além disso, é encontrada na umidade dos solos e nos seres vivos. Por isso, o ciclo da água é estudado sob dois aspectos: sem a participação dos seres vivos (ciclo curto ou pequeno) e com a participação dos seres vivos (ciclo longo ou grande).

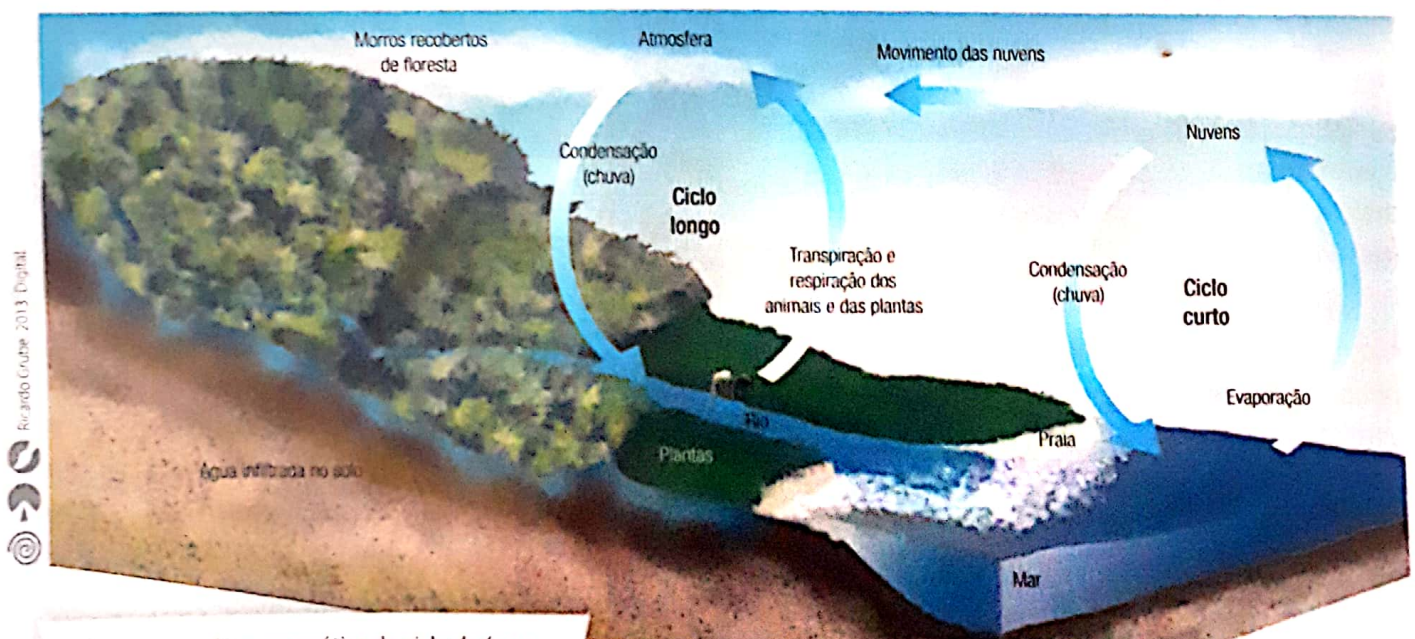
### Ciclo curto

A água dos oceanos, mares, rios, lagos e da umidade do solo evapora-se com o aumento da temperatura nesses ambientes. Depois de passar para a forma gasosa, o vapor-d'água encontra camadas atmosféricas mais frias e sofre condensação. Seu retorno aos ambientes aquáticos ou terrestres acontece por meio da **precipitação**, sob a forma de chuva ou neve.

### Ciclo longo

A água é absorvida pelos seres vivos e utilizada em suas atividades metabólicas para posterior devolução ao ambiente. As plantas absorvem a água por meio das raízes e a utilizam no transporte de nutrientes, nas reações hidrolíticas e na realização da fotossíntese. É importante lembrar que as plantas perdem água continuamente pela transpiração. Por realizarem a absorção e a liberação de água sob a forma de vapor na atmosfera, as plantas mantêm o estado higrométrico do ar (umidade) favorável ao desenvolvimento da vida.

Os animais podem ingerir água diretamente de rios, lagos, entre outros meios, ou indiretamente dos tecidos orgânicos utilizados na alimentação. A água ingerida retorna ao ambiente por meio da excreção (urina), da transpiração, da respiração e das fezes. No entanto, parte da água absorvida por plantas e animais fica incorporada a seus tecidos, sendo devolvida ao ambiente quando esses organismos morrem e sofrem decomposição.



■ Representação esquemática do ciclo da água

A água da chuva que se infiltra no solo é responsável por uma das principais reservas de água doce do planeta: os aquíferos. Eles se formam, principalmente, em locais onde há rochas porosas que possibilitam a passagem e o armazenamento da água. Como podem ser usados como fonte de água para consumo humano, os aquíferos precisam ser monitorados a fim de evitar contaminações por esgotos ou agrotóxicos, que também podem se infiltrar no solo.

Sugere-se a leitura da obra *Águas doces no Brasil*, de Aldo da C. Rebouças, Benedito Braga e José Galizia Tundisi (ver Sugestão para o professor).

## Conexões

### O planeta das águas

[...]

O ciclo hidrológico, o permanente movimento da água líquida e vapor-d'água da atmosfera e da água sob estado sólido nas geleiras, é impulsionado pela energia solar, pelo transporte de nuvens, por ventos. Esse ciclo, por sua vez tem papel fundamental nas rotas e ciclos de distribuição de elementos, substâncias e organismos. De fundamental importância nesse ciclo é o papel da vegetação. A evapotranspiração repõe água para a atmosfera a uma taxa apreciável (cerca de 30% da água na atmosfera é proveniente da evapotranspiração da vegetação) [...] as florestas contribuem para a recarga dos aquíferos subterrâneos, diminuem a erosão e removem contaminantes das águas superficiais. [...] É por esta razão que florestas ripárias ou “florestas beiradeiras” (segundo Ab'Sáber) têm um papel fundamental na regulação e manutenção de qualidade de água de rios e riachos. E também é por essa razão que os custos do tratamento de água de regiões protegidas por florestas é muito mais baixo (100 vezes menor) que o tratamento de água proveniente de mananciais degradados.

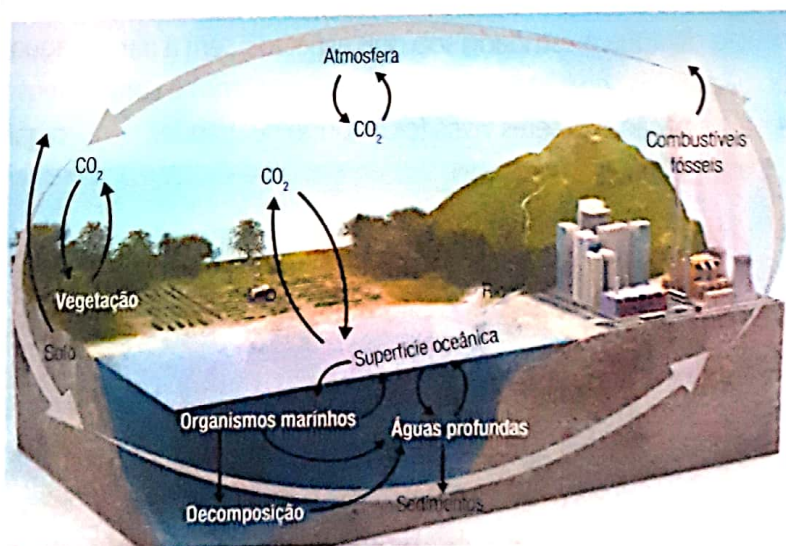
[...]

TUNDISI, José Galizia. O planeta das águas. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 63, p. 14-19, fev./mar. 2015. Edição especial.

### Ciclo do carbono

O carbono é um elemento químico fundamental à formação dos organismos, pois está presente em todos os compostos orgânicos, como proteínas, carboidratos, lipídios e ácidos nucleicos. Também existe em abundância em compostos minerais, como os carbonatos, e nos depósitos orgânicos formadores de petróleo (carvão e turfa).

Na constituição atmosférica, o carbono é encontrado principalmente na forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Organismos autótrofos fotossintetizantes, como plantas, algas e cianobactérias,



■ Esquema representativo do ciclo do carbono

utilizam o dióxido de carbono presente no ar ou na água para a produção de carboidratos (açúcares). Esses organismos, assim como os consumidores, utilizam os compostos orgânicos durante o metabolismo energético (respiração celular). Com isso, ocorre a liberação de energia para a realização das atividades metabólicas e de  $\text{CO}_2$  como resíduo respiratório, o qual é devolvido ao ar atmosférico ou à água e novamente incorporado pelas plantas na fotossíntese, fechando o ciclo.

Além do  $\text{CO}_2$ , existem outros compostos ricos em carbono que entram na constituição atmosférica, porém em quantidades bem pequenas. Um deles é o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), encontrado em quantidade aproximada de 0,1 ppm (parte por milhão); e o outro é o metano ( $\text{CH}_4$ ) resultante da **degradação anaeróbia** de compostos orgânicos. Esses dois gases são oxidados na atmosfera, produzindo novamente o  $\text{CO}_2$ .

O retorno do carbono ao ar atmosférico pode demorar milhões de anos. Isso ocorre porque a matéria orgânica pode permanecer armazenada no subsolo na forma de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e turfa. Quando o ser humano utiliza esses combustíveis, possibilita o retorno de toneladas de átomos de carbono ao ar atmosférico.

### PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS DE CARBONO DA TERRA

Reservatório	Carbono (gigatons)	Porcentagem do total de carbono da Terra
Oceanos	$38 \cdot 10^3$ (> 95% correspondem ao C inorgânico)	0,05
Rochas e sedimentos	$75 \cdot 10^6$ (> 80% correspondem ao C inorgânico)	> 99,5
Biosfera terrestre	$2 \cdot 10^3$	0,003
Combustíveis fósseis	$4,2 \cdot 10^3$	0,006
Biosfera aquática	1-2	0,000002
Hidratos de metano	$10^4$	0,014

Fonte: INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *O ciclo do carbono*. Disponível em: <<http://www.ib.usp.br/~delitti/projeto/rhavana/Index.htm>>. Acesso em: 23 set. 2015.

Indica-se a leitura dos livros 2015: *diário do carbono*, de S. Lloyd, e *A longa marcha dos grilos canibais*, de Fernando Reinach (ver Sugestões para os alunos e o professor).

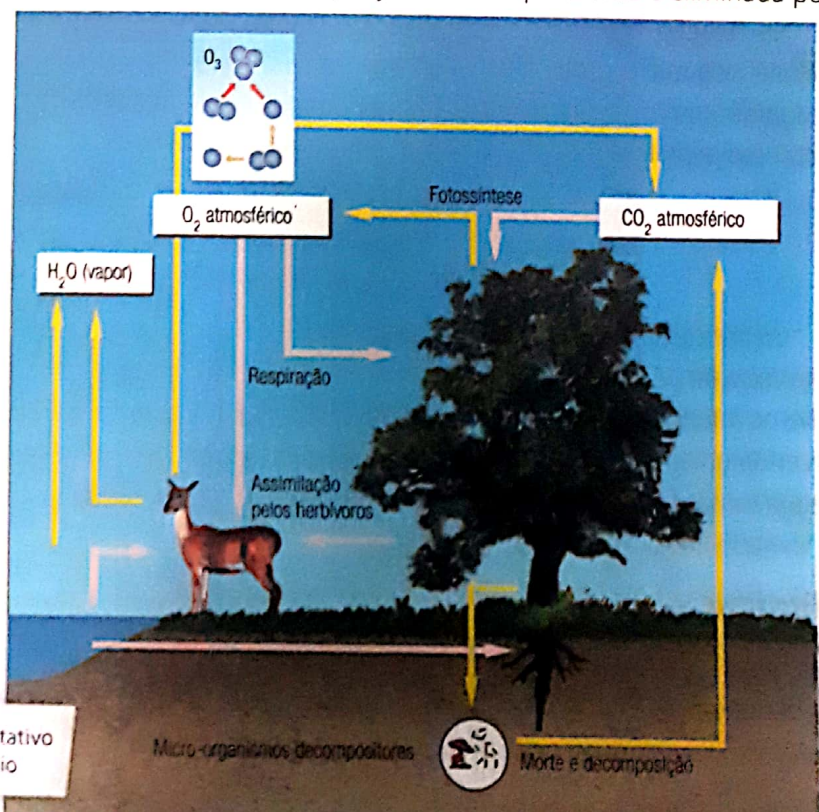
## Ciclo do oxigênio

25/01/2020

O gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ) é vital para a sobrevivência dos seres vivos, pois participa dos processos oxidativos que possibilitam a **respiração celular**. O ciclo do oxigênio envolve reações que ocorrem no metabolismo energético dos seres vivos. Isso significa que esse elemento circula, fundamentalmente, nos processos de fotossíntese e respiração celular.

As três principais fontes de átomos de oxigênio para os seres vivos são o gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). A água constitui um dos produtos formados na respiração celular e parte dela é eliminada por meio da transpiração, da excreção (urina) e das fezes, fazendo com que o oxigênio retorne ao ambiente. A outra parte é utilizada em diversos processos metabólicos, incorporando-se à estrutura dos seres vivos. Assim, os átomos de oxigênio podem voltar à atmosfera ou aos oceanos, rios e lagos pela decomposição dos organismos.

A água que retorna aos ecossistemas participa da fotossíntese. Na fase clara desse processo, ela sofre a **fotólise** (quebra em presença de luz), resultando em íons hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) e oxigênio molecular ( $\text{O}_2$ ), o qual é liberado na atmosfera, fechando o ciclo.



■ Esquema representativo do ciclo do oxigênio

Além disso, parte do oxigênio atmosférico combina-se com metais presentes no solo (ferro, silício, manganês, entre outros), formando diversos óxidos, e outra parte localiza-se na **estratosfera** (entre 10 e 45 km), na forma de **ozônio** (O<sub>3</sub>).

A camada de ozônio funciona como um filtro protetor das radiações ultravioleta. Ela se forma quando essas radiações dissociam o oxigênio molecular (O<sub>2</sub>), liberando os átomos de oxigênio, que se combinam com outras moléculas de O<sub>2</sub>, formando o ozônio (O<sub>3</sub>).

## Ciclo do nitrogênio

O nitrogênio é um elemento químico fundamental para a biodiversidade, pois está presente na constituição dos aminoácidos, que formam as proteínas, e das bases nitrogenadas, formadoras dos ácidos nucleicos (DNA e RNA). Apesar de ser muito abundante na atmosfera (aproximadamente 78%), o nitrogênio não se encontra disponível para o uso direto pela maioria dos seres vivos, pois sua estrutura molecular (N<sub>2</sub>) apresenta grande estabilidade, tornando-o pouco reativo com outros elementos.

Por esse motivo, o nitrogênio não pode ser diretamente absorvido pelas plantas. Ele é absorvido pelas raízes na forma de amônia (NH<sub>3</sub>) ou ion nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) presentes no solo e na água. Já os animais podem aproveitá-lo na forma de aminoácidos retirados dos alimentos.

Para que os seres vivos possam utilizar o nitrogênio e que seja possível seu retorno ao ar atmosférico, é fundamental a participação de micro-organismos, que realizam as quatro etapas do ciclo: **fixação**, **decomposição**, **nitrificação** e **desnitrificação**.

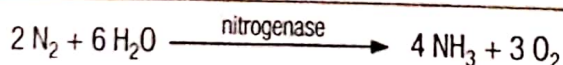
### Fixação do nitrogênio

Processo que possibilita a incorporação do nitrogênio molecular (N<sub>2</sub>), convertendo-o em compostos biodisponíveis, ou seja, substâncias que podem ser usadas pelas células.

A **fixação atmosférica** ou **não biológica** ocorre por meio da energia calorífica gerada pelos raios na atmosfera, a qual provoca a reação de oxidação do nitrogênio, formando os íons nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Estes, ao serem carregados ao solo pela ação das chuvas, ficam disponíveis para a absorção vegetal.

Na **fixação biológica** ou **biofixação**, o nitrogênio é incorporado às células dos micro-organismos fixadores de nitrogênio que vivem no solo, reagindo com os hidrogênios (da água) e produzindo **amônia** (NH<sub>3</sub>). Esse processo ocorre na presença da enzima **nitrogenase**.

Quando os compostos nitrogenados presentes em moléculas orgânicas de resíduos da excreção (urina) ou de organismos mortos sofrem decomposição, ocorre a formação de amônia (NH<sub>3</sub>) ou **amonização**. Esse processo é uma forma de obtenção de energia, pois a decomposição nada mais é que uma consequência da respiração celular de fungos e bactérias.

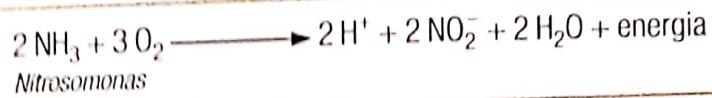


Os principais micro-organismos fixadores de nitrogênio são as cianobactérias (*Nostoc* e *Anabaena*) e as bactérias (*Azotobacter* e *Clostridium*) que vivem no solo. Existe, ainda, um grupo especial de bactérias, do gênero *Rhizobium*, que vive no interior de nódulos das raízes de plantas leguminosas (feijão, amendoim, ervilha, alfafa, entre outras), estabelecendo uma relação harmônica de mutualismo. Desse modo, os micro-organismos fornecem o nitrogênio fixado às leguminosas, e estas fornecem glicose (resultante da fotossíntese) aos fixadores. O excedente de material nitrogenado é liberado no solo na forma de amônia.

### Nitrificação

Poucas plantas conseguem absorver o nitrogênio presente na amônia. Assim, a absorção geralmente é feita na forma de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). A nitrificação corresponde aos processos que possibilitam a formação de **nitrato** no solo ou na água e ocorre em duas etapas: **nitrosação** e **nitratação**.

A **nitrosação** é realizada por bactérias do gênero *Nitrosomonas*, as quais utilizam amônia em seu processo de quimiossíntese e liberam o íon nítrito ( $\text{NO}_2^-$ ).



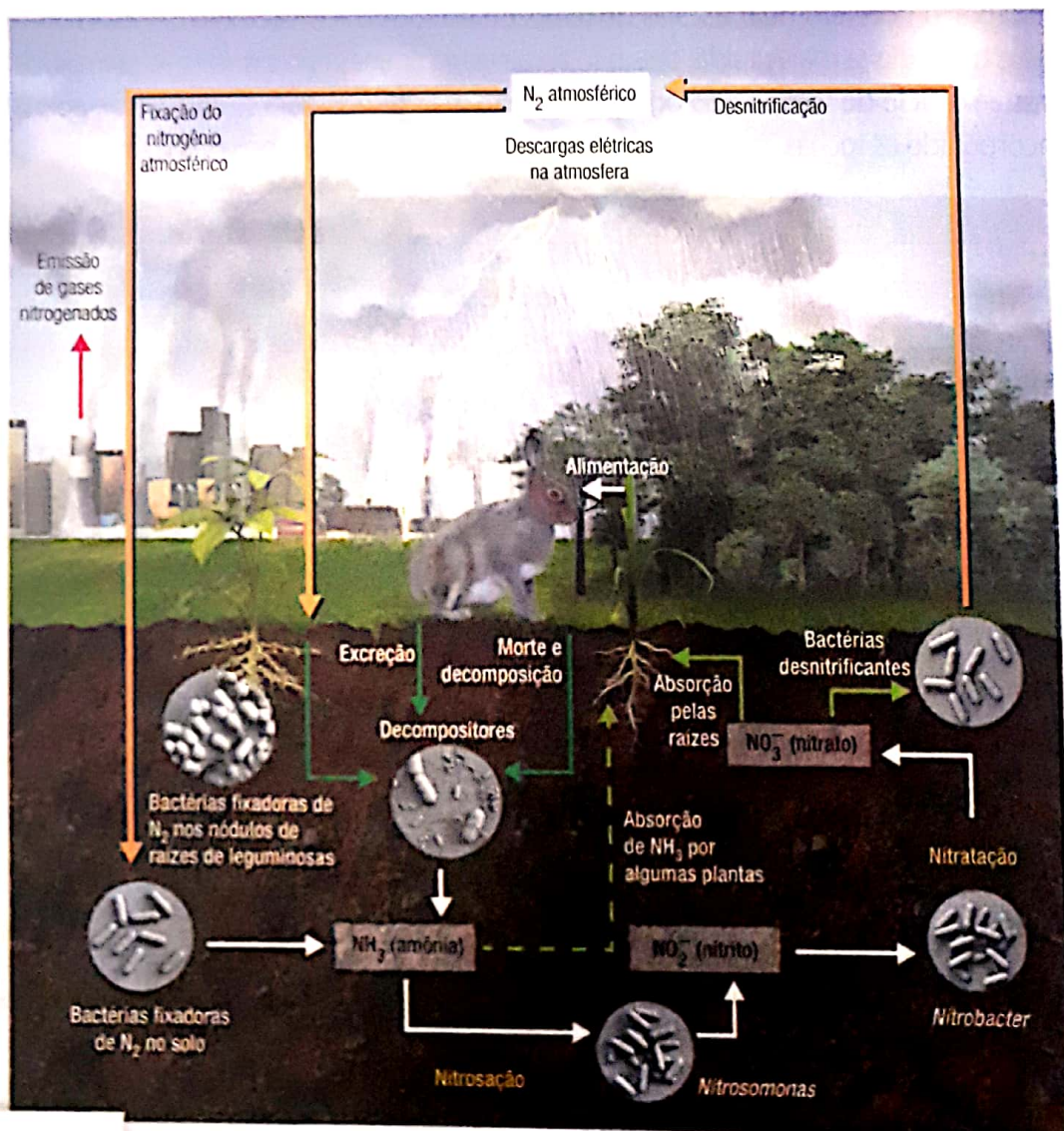
Contudo, o nítrito é tóxico para as plantas e não é absorvido por elas. Esse íon é oxidado por outro grupo de bactérias quimiossintetizantes presentes no solo, as quais realizam a **nitração**. Nesse processo, as bactérias do gênero *Nitrobacter* usam os nítritos em seu metabolismo, transformando-os em **nítratos**, que podem ser absorvidos pelas raízes das plantas e incorporados na constituição, principalmente, de suas proteínas e ácidos nucleicos.

Assim, quando os vegetais são consumidos nas cadeias alimentares pelos herbívoros, o nitrogênio também passa a fazer parte de suas estruturas moleculares.



## Desnitrificação

Uma parte dos compostos nitrogenados presentes no solo segue a via da nitrificação e outra parte é convertida em nitrogênio molecular ( $\text{N}_2$ ), o qual reinicia o ciclo. Essa conversão é realizada pelas bactérias desnitrificantes do gênero *Pseudomonas*. Quando a disponibilidade do oxigênio atmosférico é menor, essas bactérias utilizam o oxigênio existente no nítrato para produzir energia. Assim, o gás nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) é liberado e retorna à atmosfera.



Esquema representativo do ciclo do nitrogênio

Os nitratos são nutrientes minerais escassos em muitos solos agrícolas e sua adição por adubação artificial (fertilizantes químicos industrializados), além de prejudicar o solo e reservatórios de água doce, requer alto gasto financeiro. Contudo, existem técnicas naturais e baratas de fertilização do solo que não agridem o meio ambiente, como a rotação de culturas e a adubação verde.

A **rotação de culturas** consiste em alternar plantações de arroz, milho ou trigo com leguminosas, como feijão e soja. Esse recurso é muito utilizado na agricultura, pois tem como grande benefício o mutualismo existente entre as leguminosas e as bactérias fixadoras, que repõem o nitrogênio retirado do solo por outras plantas.

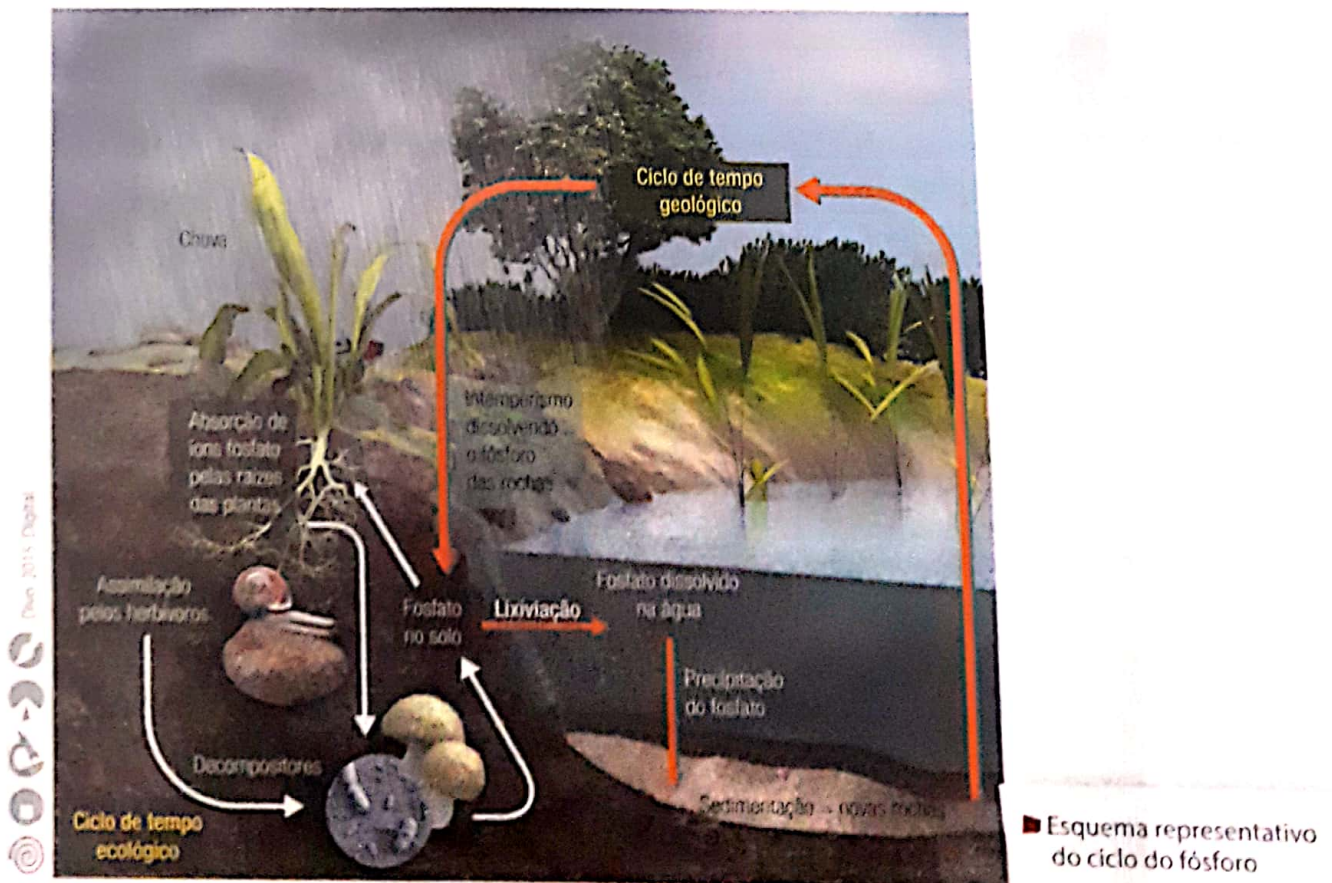
Na **adubação verde**, algumas leguminosas são inseridas entre as plantações e, quando cortadas, podem ser deixadas recobrando o solo. Esses restos vegetais sofrem decomposição, enriquecendo o solo com compostos nitrogenados.

Entre as vantagens da rotação de culturas e da adubação verde, estão melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo; controle de plantas daninhas, bem como de doenças e pragas (fungos, lagartas e vermes); reposição de restos orgânicos; proteção do solo contra a ação de agentes climáticos; e economia no uso de fertilizantes nitrogenados.

## Ciclo do fósforo

O fósforo (P) é um importante elemento químico para a formação dos seres vivos, pois faz parte da constituição dos ácidos nucleicos e, principalmente, das moléculas energéticas, como a adenosina trifosfato (ATP). O ciclo do fósforo concentra-se no solo, nas rochas e nos seres vivos, pois esse elemento não apresenta compostos gasosos. As plantas utilizam os **íons fosfato** ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) encontrados na água que absorvem do solo, e os animais obtêm esse íon pela ingestão de água e alimentos. O retorno do fósforo ao ambiente ocorre pela decomposição da matéria orgânica.

O ciclo do fósforo acontece em duas escalas de tempo: o ecológico e o geológico. O **ciclo de tempo ecológico** ocorre localmente e de maneira mais rápida, pois o fósforo circula apenas entre o solo, as plantas, os consumidores e os decompositores. Já o **ciclo de tempo geológico** leva muito mais tempo para se completar, pois o fósforo presente no ambiente é incorporado às rochas, tornando-se lentamente disponível para os seres vivos.



**lixiviação:** caracteriza-se pela ação da água da chuva, que ao se infiltrar nas camadas mais profundas do solo, dissolve os nutrientes.