



CIÊNCIA DO

SOLO

PARA GRADUANDOS

ADRIANA MODOLON DUART | BEATRIZ RODRIGUES BAGNOLIN MUNIZ

BETEL CAVALCANTE LOPES | CAROLINA AYUMI KANEJI ABATT

CAROLINE APARECIDA MATIAS PIEREZAN | DANIELA TOMAZELLI | DANIELY NECKEL ROSINI

DOUGLAS ALEXANDRE | ELIAS DA SILVA SCOPEL | GABRIELA DOS SANTOS CASTRO

JORDANA DOS ANJOS XAVIER | JULIANA MARIA CASTILHO DINIZ | MARI LUCIA CAMPOS

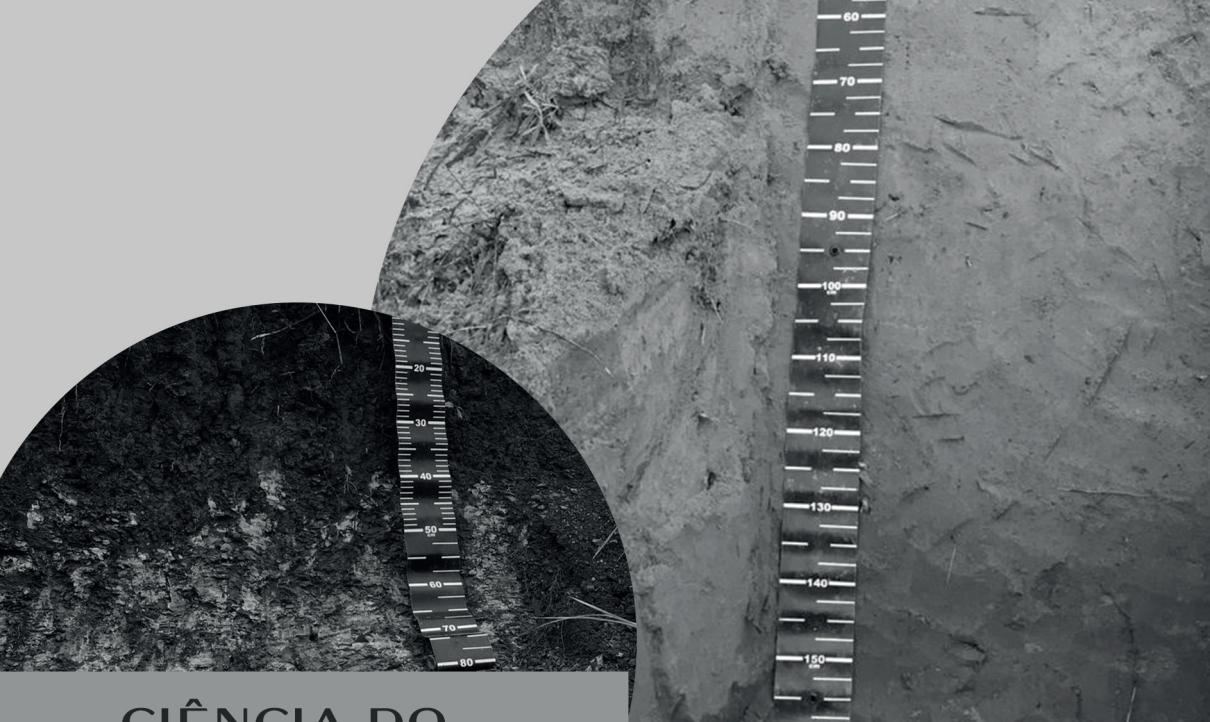
NATACHA MADRUGA FARIAS | RAFAELA ALVES DOS SANTOS PERON | RENATA NETO DUARTE

THIAGO RAMOS FREITAS

ORGANIZADORES

ELIAS DA SILVA SCOPEL | MARI LUCIA CAMPOS | LUIZ PAULO RAUBER | DOUGLAS ALEXANDRE

CAROLINE APARECIDA MATIAS PIEREZAN | CAROLINA AYUMI | NATACHA MADRUGA FARIAS



CIÊNCIA DO

SOLO

PARA GRADUANDOS

ADRIANA MODOLON DUART | BEATRIZ RODRIGUES BAGNOLIN MUNIZ

BETEL CAVALCANTE LOPES | CAROLINA AYUMI KANEJI ABATT

CAROLINE APARECIDA MATIAS PIEREZAN | DANIELA TOMAZELLI | DANIELY NECKEL ROSINI

DOUGLAS ALEXANDRE | ELIAS DA SILVA SCOPEL | GABRIELA DOS SANTOS CASTRO

JORDANA DOS ANJOS XAVIER | JULIANA MARIA CASTILHO DINIZ | MARI LUCIA CAMPOS

NATACHA MADRUGA FARIAS | RAFAELA ALVES DOS SANTOS PERON | RENATA NETO DUARTE

THIAGO RAMOS FREITAS

ORGANIZADORES

ELIAS DA SILVA SCOPEL | MARI LUCIA CAMPOS | LUIZ PAULO RAUBER | DOUGLAS ALEXANDRE

CAROLINE APARECIDA MATIAS PIEREZAN | CAROLINA AYUMI | NATACHA MADRUGA FARIAS

2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora

Editora chefe

Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo desta obra, em sua forma, correção e confiabilidade, é de responsabilidade exclusiva dos autores. As opiniões e ideias aqui expressas não refletem, necessariamente, a posição da Atena Editora, que atua apenas como mediadora no processo de publicação. Dessa forma, a responsabilidade pelas informações apresentadas e pelas interpretações decorrentes de sua leitura cabe integralmente aos autores.

A Atena Editora atua com transparência, ética e responsabilidade em todas as etapas do processo editorial. Nosso objetivo é garantir a qualidade da produção e o respeito à autoria, assegurando que cada obra seja entregue ao público com cuidado e profissionalismo.

Para cumprir esse papel, adotamos práticas editoriais que visam assegurar a integridade das obras, prevenindo irregularidades e conduzindo o processo de forma justa e transparente. Nosso compromisso vai além da publicação, buscamos apoiar a difusão do conhecimento, da literatura e da cultura em suas diversas expressões, sempre preservando a autonomia intelectual dos autores e promovendo o acesso a diferentes formas de pensamento e criação.

Ciência do Solo para Graduandos

| Organizadores:

Mari Lucia Campos
Luiz Paulo Rauber
Douglas Alexandre
Caroline Aparecida Matias Pierezan
Carolina Ayumi
Natacha Madruga Farias
Elias da Silva Scopel

| Revisão:

Os autores

| Diagramação:

Nataly Gayde

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C569 Ciência do solo para graduandos / Organizadores Mari Lucia Campos, Luiz Paulo Rauber, Douglas Alexandre, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2025.

Outras organizadoras
Caroline Aparecida Matias Pierezan
Carolina Ayumi
Natacha Madruga Farias

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-3625-6
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.256251209>

1. Solos. I. Campos, Mari Lucia (Organizadora). II. Rauber, Luiz Paulo (Organizador). III. Alexandre, Douglas (Organizador). IV. Título.

CDD 631.45

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

☎ +55 (42) 3323-5493

☎ +55 (42) 99955-2866

🌐 www.atenaeditora.com.br

✉ contato@atenaeditora.com.br

CONSELHO EDITORIAL

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

AGRADECIMENTOS

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro ao Programa de Apoio a Pesquisa PAP UDESC-FAPESC 2023 TR733 e PROAP-CAPES, e ao Programa de demanda social CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa.

SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

GÊNESE DO SOLO

Daniely Neckel Rosini

Renata Neto Duarte

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2562512091>

CAPÍTULO 2..... 35

QUÍMICA DO SOLO

Caroline Aparecida Matias Pierezan

Juliana Maria Castilho Diniz

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2562512092>

CAPÍTULO 3..... 58

MORFOLOGIA E FÍSICA DO SOLO

Elias da Silva Scopel

Adriana Modolon Duart

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2562512093>

CAPÍTULO 4..... 74

MATÉRIA ORGÂNICA E BIOLOGIA DO SOLO

Douglas Alexandre

Daniela Tomazelli

Rafaela Alves dos Santos Peron

Thiago Ramos Freitas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2562512094>

CAPÍTULO 5..... 92

SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (SIBCS)

Mari Lucia Campos

Jordana dos Anjos Xavier

Carolina Ayumi Kaneji Abatt

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2562512095>

SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 6 97

SOLOS FLORESTAIS

Betel Cavalcante Lopes

Gabriela dos Santos Castro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2562512096>

CAPÍTULO 7 111

POLUIÇÃO DO SOLO

Beatriz Rodrigues Bagnolin Muniz

Natacha Madruga Farias

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2562512097>

GABARITO133



C A P Í T U L O 1

GÊNESE DO SOLO

Daniely Neckel Rosini

Renata Neto Duarte

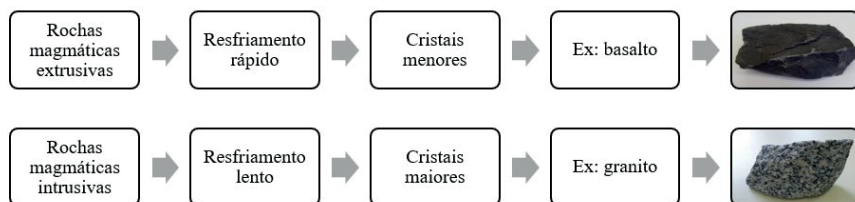
1.1 COMPOSIÇÃO DA CROSTA TERRESTRE

A crosta terrestre é constituída por diferentes tipos de rochas, que podem ser classificadas em três grupos principais: magmáticas, metamórficas e sedimentares (Teixeira, 2007).

As rochas magmáticas se originam da solidificação do magma (Figura 1.1) e é a partir delas que se formam as rochas sedimentares e metamórficas. Conforme o magma vai se resfriando, vão se formando os cristais, sendo que os primeiros minerais a serem cristalizados são a olivina e a anortita. O quartzo é um dos últimos minerais a se cristalizar e vai preenchendo os espaços intersticiais. Quanto mais o magma demora para resfriar, mais cristais grandes se formam, pois há tempo para ocorrer a polimerização dos elementos.

As **rochas magmáticas** podem ser extrusivas ou intrusivas. O processo de formação das rochas extrusivas ocorre quando o magma do vulcão extravasa para a superfície e resfria de forma rápida, originando cristais menores, como ocorre na formação do basalto. Quando o magma fica no interior da crosta, ele demora mais para solidificar, isso faz com que se formem cristais maiores, formando as rochas intrusivas como, por exemplo, no granito, em que é possível observar a olho nu cristais de quartzo, mica, feldspato e anfibólio.

Figura 1.1 - Processo de formação das rochas magmáticas extrusivas e intrusivas.



Os minerais essenciais das rochas são os que ocorrem em maior proporção que os minerais acessórios. Os principais minerais essenciais são os feldspatos, quartzo, piroxênios, anfibólios, olivinas e micas.

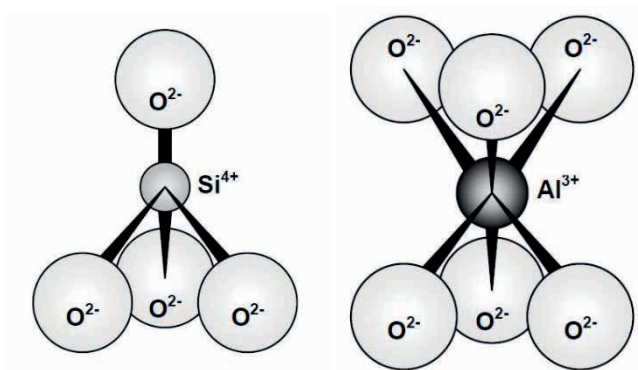
De acordo com a coloração, as rochas magmáticas podem ser classificadas conforme o que está expresso na Tabela 1.1 (Ker et al. 2012):

Tabela 1.1- Coloração das rochas e minerais que as constituem.

Tipo	Coloração	Minerais	Rochas
Leucocrática	Predominam minerais de cor clara	Feldspato, quartzo e muscovita	Granito e riolito
Melanocrática	Mais de 60% de minerais escuros	Anfibólios, piroxênios e biotita.	Basalto, diabásio e gabo
Mesocrática	Rochas intermediárias com 30 a 60% de minerais escuros.	Minerais máficos	Andesito e diorito

As rochas são compostas principalmente por elementos em forma de óxidos, como o óxido de silício (SiO_2) e o óxido de alumínio (AlO_3) (Figura 1.2).

Figura 1.2- Tetraedro de silício e octaedro de alumínio.



Fonte: Cresser et al. (1993)

Quanto maior for a proporção de SiO_2 , menor será a dos demais óxidos como FeO , MgO , CaO , K_2O na rocha. Quanto mais SiO_2 , mais clara será a rocha pela quantidade menor de minerais de ferro, cálcio e magnésio, por isso, granito e riolito normalmente originam solos pobres. Já as rochas pobres em SiO_2 , como o basalto e o gabro, são mais escuras por terem mais ferro, cálcio e magnésio, possuindo maior probabilidade de originar solos férteis.

De acordo com os elementos que compõem as rochas magmáticas, elas podem ser classificadas conforme o teor de óxido de silício (Tabela 1.2) (IBGE, 2015):

Tabela 1.2 Classificação das rochas de acordo com o teor de óxido de silício (SiO_2).

Classificação	Teor de SiO_2	Exemplos de rochas
Ácida	> 65%	Granito, pegmatito, pórfiro e riolito
Intermediária	Entre 52 e 65%	Sienito, diorito e andesito
Básica	Entre 45 e 52%	Gabro, diabásio e basalto
Ultrabásica	<45%	Peridotito

As **rochas sedimentares** são oriundas da intemperização de outros tipos de rochas. Elas se formam a partir da deposição e compactação de sedimentos ao longo do tempo geológico. Os sedimentos são fragmentos de rochas pré-existentes, minerais, matéria orgânica e detritos transportados pela água, vento ou gelo, que se acumulam em bacias sedimentares, como lagos, rios, oceanos e desertos. Com o tempo, esses sedimentos são gradualmente compactados pela sobreposição de camadas de sedimentos subsequentes e submetidos a processos de diagênese, que envolvem a compactação e a cimentação dos sedimentos. Existem três principais categorias de rochas sedimentares:

- Rochas sedimentares detríticas ou clásticas: são formadas pela acumulação e cimentação de sedimentos clásticos, que são fragmentos de rochas e minerais transportados e depositados por agentes como água, vento ou gelo. Exemplos: arenito, conglomerados e argilito;
- Rochas sedimentares químicas: são formadas pela precipitação de minerais em solução. Quando a água evapora ou se torna saturada em certos minerais, ocorre a formação dessas rochas. Exemplos: pirita, aragonita e fosforita;
- Rochas sedimentares orgânicas: são formadas a partir da acumulação de material orgânico, como restos de plantas e animais. Com o tempo, esses materiais orgânicos são compactados e transformados em rochas, como o carvão e o calcário fossilífero.

As **rochas metamórficas** se formam a partir da transformação de rochas pré-existentes por meio de processos físicos e químicos que ocorrem em condições de temperatura e pressão elevadas. As rochas metamórficas exibem uma variedade de características, como foliação (arranjo de minerais em camadas ou bandas), lineação (orientação preferencial dos minerais) e recristalização de minerais (Tabela 1.3) (Teixeira et al. 2007).

Tabela 1.3- Exemplos de rochas metamórficas, coloração e rocha de origem.

Rocha metamórfica		Coloração	Rocha de origem
Gnaisse		Geralmente clara e bandeada	Granito e riodalito
Migmatito		Granulação fina e laminada	Rochas ígneas, como granitos e dioritos, ou rochas sedimentares, como arenitos e argilitos
Micaxisto		Granulação fina e laminada	Rochas ígneas ou sedimentares constituídas por micas, quartzo e argilas
Mármore		Variável e bandeada	Calcário
Anfibólito		Rocha escura	Basalto ou gabro

1.2 INTEMPERISMO

O intemperismo é um conjunto de processos naturais que ocorrem na superfície da terra, resultando na decomposição e alteração das rochas e outros materiais expostos ao ambiente. É um processo contínuo e gradual que ocorre ao longo do tempo geológico, por meio de processos físicos, químicos e biológicos que resultam na decomposição, desagregação e transformação das rochas em solo (Teixeira et al. 2007).

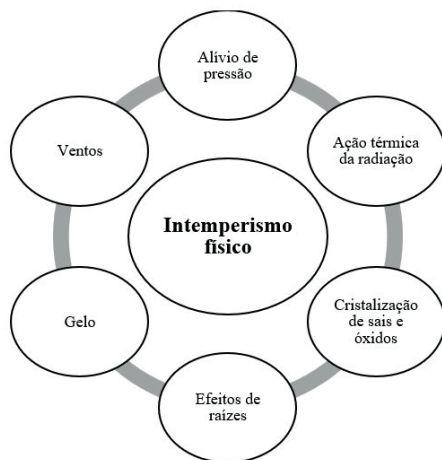
A ação do intemperismo desempenha um papel fundamental na formação do solo ao longo do tempo geológico, na modelagem da paisagem e na liberação de nutrientes para os ecossistemas. Além disso, também contribui para a formação da estrutura do solo, que permite a circulação adequada de ar, água e organismos, facilitando o crescimento das raízes das plantas.

O intemperismo das rochas pode ser classificado em três tipos: físico, químico ou biológico.

1.2.1 Intemperismo físico

O intemperismo físico é um processo natural que causa a desintegração e fragmentação das rochas sem alterar sua composição química. Esse tipo de intemperismo ocorre devido a ações físicas e agentes externos que atuam sobre as rochas, resultando em sua fragmentação em pedaços menores. A Figura 1.3 mostra os agentes do intemperismo físico (Teixeira et al. 2007).

Figura 1.3- Agentes do intemperismo físico.



O alívio de pressão é um fator inicial na degradação das rochas, seja por levantamento da crosta ou erosão geológica das camadas superiores, ocasionando fendilhamentos. Outro fator importante é a água, que, quando se infiltra nas rachaduras das rochas e congela, ela se expande e exerce pressão sobre as paredes das fissuras. O congelamento e o descongelamento repetidos podem aumentar a extensão das rachaduras, fragmentando as rochas. As mudanças diárias de temperatura, bem como as variações sazonais, podem causar o intemperismo físico nas rochas. O aquecimento e o resfriamento repetidos levam à dilatação e contração das rochas, resultando em rachaduras e fraturas.

Sais ou óxidos provenientes da dissolução de minerais das rochas, ao cristalizarem em poros ou fendas, aumentam de volume, ocasionando a desintegração. A ação do vento transportando partículas de areia também pode causar abrasão nas rochas, desgastando-as ao longo do tempo. A ação mecânica das raízes das plantas por busca de água e nutrientes, exerce pressão sobre as paredes das rachaduras, contribuindo para o desgaste e a fragmentação das rochas.

1.2.2 Intemperismo químico

No intemperismo químico, os minerais da rocha são parciais ou totalmente dissolvidos e se transformam em outros. O intemperismo químico envolve reações químicas que modificam a composição dos minerais e rochas ao longo do tempo. Ele desempenha um papel fundamental na formação do solo, uma vez que a alteração química dos minerais das rochas forma os componentes minerais do solo. Além disso, o intemperismo químico também contribui para a liberação de nutrientes essenciais para as plantas, afetando a fertilidade do solo. Os principais processos de intemperismo químico são a hidrólise, a oxirredução e a hidratação e desidratação dos minerais (Teixeira et al. 2007).

As reações de intemperismo químico podem ser resumidas pela seguinte expressão (Toledo et al. 2007):

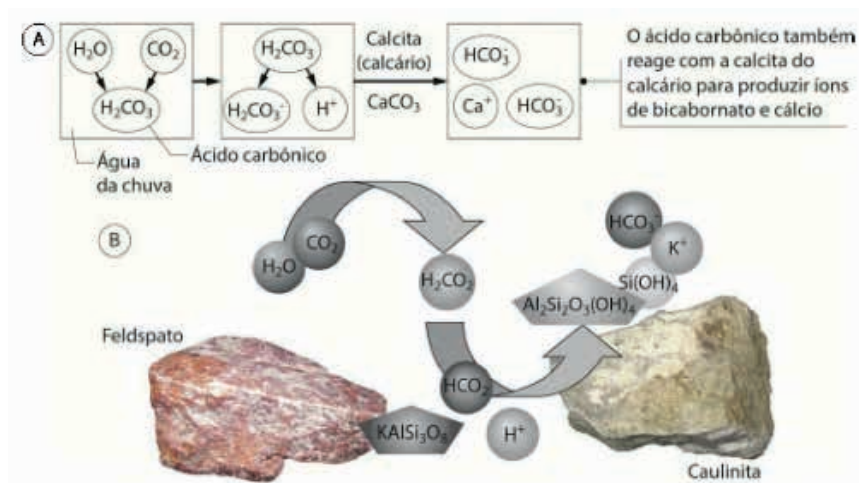
Mineral Primário + solução de alteração Mineral Secundário + solução de lixiviação

Os agentes do intemperismo químico podem ser a água, o oxigênio e os ácidos orgânicos e inorgânicos. Vale ressaltar que os minerais primários se formaram como parte integrante do processo da rocha original. Já os minerais secundários se formaram posteriormente em relação aos minerais primários, por meio de processos de alteração ou intemperismo.

A hidrólise é o processo de reação química de minerais com a água. A água penetra nas rachaduras das rochas e reage com os minerais, resultando na dissolução de certos minerais e na formação de novos minerais. A hidrólise é uma reação de intemperismo de grande importância nas regiões com clima tropical.

Nesse processo, ocorre a destruição da estrutura dos minerais, resultando na quebra das ligações químicas entre os elementos químicos que compõem cada mineral. Os elementos químicos são liberados na água, na forma de cátions e ânions dissolvidos. Esses elementos dissolvidos podem se combinar novamente para formar novos minerais, conhecidos como minerais secundários. Eles também podem ser lixiviados do perfil do solo juntamente com a água de drenagem ou serem absorvidos pelas raízes das plantas. O ácido carbônico, presente na água da chuva, é formado pela interação das moléculas de água com o CO_2 da atmosfera, desempenha um papel fundamental no início do processo de hidrólise e na lixiviação dos produtos resultantes (Figura 1.4).

Figura 1.4- Reações de intemperismo químico sob condições de clima quente e úmido: Dissolução da calcita formando íons de bicarbonato e de cálcio (A) hidrólise do feldspato potássico formando íons de potássio e ácido silícico (B).



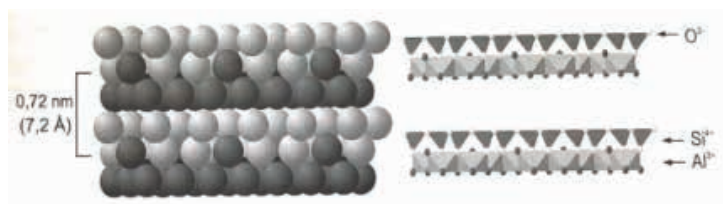
Fonte: Lepsch (2021).

Para que ocorra o processo de hidrólise, a água com os sais precisa ser renovada, ou a hidrólise cessa. Por isso, em climas úmidos, os solos são mais profundos devido a maior movimentação da água no solo. O pH também é um fator importante pois influencia na solubilidade do Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 . Quanto mais Ca e Mg os minerais

tiverem, maior será o pH da solução. O Al_2O_3 e o Fe_2O_3 são solúveis em pH próxima a 10. Em ambientes lixiviantes com pH entre 5 e 6 a solubilidade dessas moléculas será baixa. A hidrólise pode ser classificada em total ou parcial, dependendo do ambiente e da lixiviação do silício e das bases K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

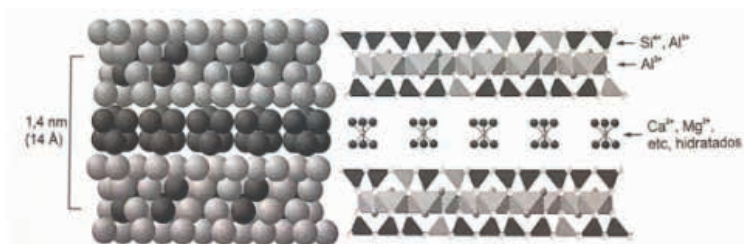
A hidrólise parcial ocorre em ambientes com lixiviação menos eficiente. A monossilatização ocorre quando o processo tem alta lixiviação de H_4SiO_4 e K e origina minerais secundários 1:1 (uma camada de tetraedros de Si e uma de octaedros de Al), como a caulinita (Figura 1.5). A bissialitização gera minerais 2:1 (duas camadas de tetraedros de Si com uma de octaedros de Al entre elas) (Figura 1.6), como as esmectitas. Já na hidrólise total, também chamada de elitização (apenas octaedros de Al), ocorre a lixiviação total do H_4SiO_4 , originando a gibbsita.

Figura 1.5- Mineral 1:1 (Caulinita).



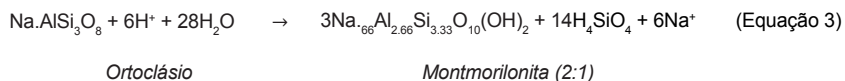
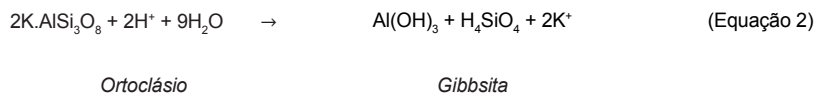
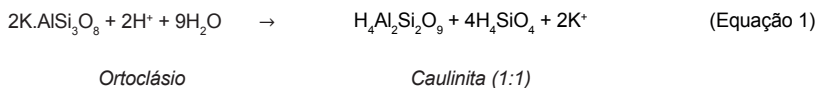
Fonte: Schulze (2002).

Figura 1.6- Mineral 2:1 (Vermiculita).



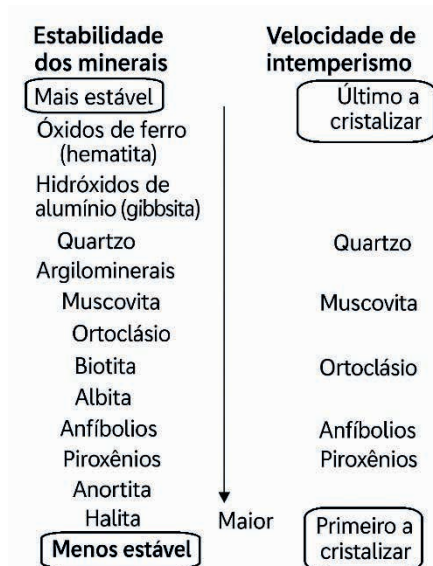
Fonte: Schulze (2002).

Um mesmo mineral pode formar diferentes minerais de argila, ou gibbsita, dependendo do clima, pH e lixiviação. A Equação 1 mostra a reação de formação do mineral 1:1, a caulinita, em condições de médio fluxo de lixiviação, pH 5 a 7 e remoção parcial da sílica. A Equação 2 expressa a formação da gibbsita, que ocorre em regiões com alto fluxo lixiviante, pH baixo e remoção completa da sílica. A Equação 3 mostra a formação do mineral 2:1, a montmorinolita em climas mais secos, com pH elevado e pouca lixiviação.



O Al é um elemento com baixa mobilidade, por isso os oxi-hidróxidos de Al e Fe predominam em solos com intemperismo químico intenso. A Figura 1.7 mostra a estabilidade dos minerais. A solubilidade dos elementos que estão presentes na rocha segue a ordem (Polinov, 1937): Ca > Na > Mg > K > Si > Fe > Al.

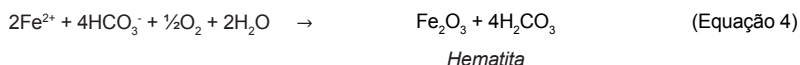
Figura 1.7- Estabilidade dos minerais seguindo a série de Goldich.



Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2000).

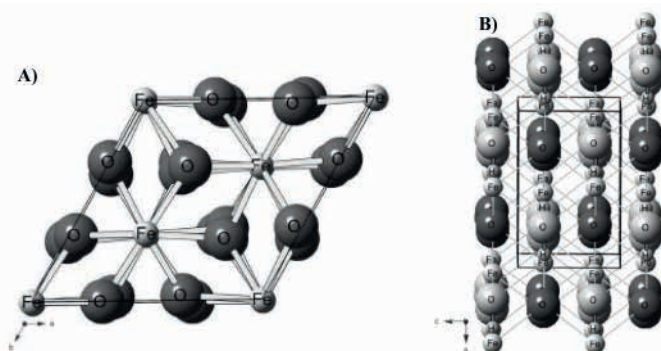
A dissolução e a oxirredução também são reações importantes do intemperismo químico. Alguns minerais são solúveis em água e podem ser dissolvidos pelo intemperismo químico. A solubilização ocorre com alguns minerais na presença de água, como a halita (NaCl), anidrita (CaSO₄) e calcita (CaCO₃). Por exemplo, a calcita presente em rochas como o calcário pode ser dissolvida pela ação de água levemente ácida, resultando em processos de carstificação, como a formação de cavernas e dolinas. Já a hidratação ocorre quando minerais reagem com a água, incorporando moléculas de água em sua estrutura. Isso pode causar expansão e enfraquecimento das rochas, contribuindo para sua desintegração.

O processo de oxidação ocorre quando há a perda de elétrons. Muitos elementos podem ser oxidados ao se combinar com o oxigênio, como o Fe e o Mn. Nos minerais primários, quase sempre o ferro se encontra na forma reduzida (Fe²⁺), não oxidante. Por meio da hidrólise, minerais contendo ferro são expostos ao oxigênio atmosférico. O oxigênio reage com o ferro presente nos minerais, resultando na oxidação do ferro (Fe³⁺) e na formação de óxidos e hidróxidos de ferro. Se o ambiente for bem drenado, o ferro irá oxidar e produzir um novo mineral, que pode ser a Hematita (Equação 4) (Figura 1.8). Esse processo é responsável pela cor avermelhada de algumas rochas intemperizadas.



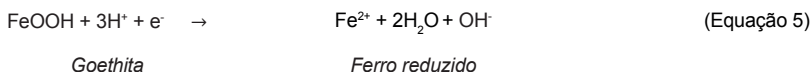
Quando o ferro dissolvido sofre oxidação num ambiente com maior presença de água, poderá formar um óxido hidratado de ferro, pois o ferro reduzido se encontra com o oxigênio e forma o óxido de ferro hidratado chamado de Goethita (Figura 1.8), que terá coloração amarelada ou marrom.

Figura 1.8- Estrutura cristalina da hematita (A) e goethita (B).



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2013).

Quando há deficiência de oxigênio no processo, pode ocorrer o processo de redução. A redução ocorre quando o material está saturado com água e há baixo suprimento de oxigênio, isso faz com que haja o ganho de elétrons. O Fe^{3+} pode reduzir para Fe^{2+} e o Mn^{3+} ou o Mn^{4+} para o Mn^{2+} . Isso acontece principalmente em fendas com confinamento de água por períodos prolongados. Utilizando o exemplo dos óxidos de ferro, a hematita ou goethita previamente formadas podem sofrer redução e produzir oxidrilas, aumentando o pH do ambiente e tornando o ferro solúvel (Equação 5).



1.2.3 Intemperismo biológico

O intemperismo biológico é um processo natural de decomposição e desgaste das rochas e minerais da Terra causado pela ação dos seres vivos, como plantas, animais, bactérias e outros microrganismos. Esses organismos desempenham um papel importante na fragmentação e alteração das rochas por meio de diferentes mecanismos.

A atividade biológica pode ter vários efeitos no intemperismo. Por exemplo, as raízes das plantas podem penetrar nas fissuras das rochas, exercendo pressão física e aumentando a exposição das superfícies à água e outros agentes intemperizantes. Além disso, algumas plantas podem secretar ácidos orgânicos que auxiliam na dissolução dos minerais das rochas, acelerando sua decomposição química. Por isso, a rizosfera é de fundamental importância para a formação do solo. A respiração das raízes também é um processo importante, pois produz gás carbônico, que se dissolve na água e reduz o pH. A absorção de cátions das famílias dos metais alcalinos e alcalinos terrosos pelas raízes das plantas resulta na exsudação de íons H^+ , o que leva a uma acidificação do solo devido à redução do pH.

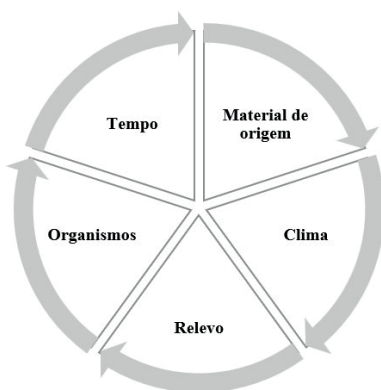
Os animais também podem contribuir para o intemperismo biológico. Por exemplo, organismos escavadores, como minhocas, podem misturar o solo e as rochas, facilitando sua exposição aos processos de intemperismo. Além disso, os microrganismos presentes no solo podem produzir substâncias químicas que decompõem os minerais e liberam nutrientes importantes para as plantas.

Os líquens excretam ácidos orgânicos, como o oxálico, que podem dissolver minerais primários e complexar ou quelar cátions metálicos.

1.3 FATORES DE FORMAÇÃO DO SOLO

Os fatores de formação do solo, também conhecidos como fatores de formação pedogenética, são elementos-chave identificados pelo cientista russo Vasily Dokuchaev como responsáveis pela formação e desenvolvimento dos solos. Esses fatores são inter-relacionados e atuam em conjunto para determinar as características e propriedades dos solos em determinada região. Os principais fatores de formação do solo, de acordo com Dokuchaev (1883) são: material de origem, clima, organismos vivos, relevo e tempo (Figura 1.9) (Jenny, 1994).

Figura 1.9- Fatores de formação do solo.



Fonte: Os autores.

1.3.1 Material de origem

O material de origem é um dos fatores de formação do solo e desempenha um papel fundamental no desenvolvimento das características do solo. O solo se origina a partir do intemperismo das rochas e sedimentos existentes na região. O tipo de material de origem influencia diretamente a composição química, textura, estrutura e propriedades físicas do solo resultante. Diferentes tipos de rochas e sedimentos produzem solos com características distintas. Por exemplo, solos originados de rochas ígneas, como granito, podem ser mais ricos em minerais como quartzo e feldspato. Rochas com mais quartzo dão origem a solos mais arenosos. Já solos originados de rochas sedimentares, como calcário, podem ser ricos em carbonato de cálcio, possuindo pH mais elevado.

Além disso, o grau de intemperismo e a taxa de decomposição do material de origem também influenciam a formação do solo. Materiais de origem mais intemperizados geralmente resultam em solos mais desenvolvidos, com maior acúmulo de matéria orgânica e nutrientes disponíveis para as plantas.

Tabela 1.4- Composição química/mineralógica das rochas.

Classe	Exemplos	Características	Solos formados
Félsicas	Granito Gnaiss	Pobres em Ca, Mg e Fe	Solos geralmente cauliniticos e pobres, mas depende do clima
Máficas	Basalto, gabro, diabásio	Ricos em Ca, Mg e Fe	Pouco quartzo, solos mais argilosos.

Fonte: Adaptado de Kampf e Curi (2012).

Os solos autóctones referem-se aos solos que se desenvolvem a partir do material de origem existente no local, sem transporte significativo de sedimentos de outras áreas. Esses solos são formados *in situ*, diretamente a partir da decomposição e intemperismo das rochas e minerais presentes no local. Os solos autóctones são comumente encontrados em regiões onde a erosão é mínima e onde as rochas subjacentes permanecem relativamente intactas. A formação desses solos ocorre ao longo de períodos consideráveis, à medida que as rochas são expostas às condições climáticas e processos de intemperismo. Os solos autóctones podem variar em termos de composição mineralógica, textura e fertilidade, dependendo das características das rochas subjacentes. Por exemplo, solos autóctones formados a partir de rochas ricas em minerais de argila podem ter uma textura mais argilosa e uma maior capacidade de retenção de água, enquanto solos autóctones formados a partir de rochas ricas em minerais de areia podem ter uma textura mais arenosa e uma drenagem mais rápida.

Os sedimentos podem ser de natureza mineral ou orgânica e são importantes para a formação dos solos alóctones. Esses sedimentos são compostos por fragmentos de rochas e minerais provenientes da erosão e transporte pela água, vento ou gelo. Os sedimentos podem ainda ser classificados como coluviais, materiais transportados de pontos mais altos da encosta para áreas mais baixas, e aluviais, transportados pelos rios e depositados nas margens após transbordamento. Quando os sedimentos minerais se acumulam em determinada área, eles passam por processos de intemperismo, nos quais são fragmentados, decompostos e transformados em solo ao longo do tempo.

O tipo e a composição dos minerais presentes nos sedimentos influenciam diretamente as características do solo resultante. Os minerais dos sedimentos podem variar em termos de tamanho de partícula, composição química e estrutura cristalina. Por exemplo, sedimentos com alta concentração de minerais de argila podem resultar em solos com maior capacidade de retenção de água e nutrientes. Por outro lado, sedimentos com alta concentração de minerais de areia podem produzir solos com maior porosidade e drenagem mais rápida.

Além disso, a mineralogia dos sedimentos minerais também pode influenciar a fertilidade do solo. Minerais como feldspato, mica e calcita podem fornecer nutrientes essenciais, como potássio, cálcio e magnésio, à medida que sofrem decomposição e liberação de íons. Esses minerais também contribuem para a formação de argilas, que desempenham um papel importante na estruturação do solo.

Os sedimentos colúviais desempenham um papel importante na formação dos solos, especialmente em áreas de encostas e declives. Esses sedimentos são formados pela acumulação de material resultante da ação gravitacional, como deslizamentos, escorregamentos e erosão superficial. Quando ocorrem processos de movimentação de massa, como deslizamentos de solo ou rochas, o material desprendido tende a acumular-se no pé das encostas, formando depósitos colúviais. Esses sedimentos são compostos por uma mistura de solo, fragmentos de rochas e outros materiais transportados pela ação da gravidade.

Os sedimentos colúviais possuem características distintas em relação aos solos formados diretamente da decomposição das rochas *in situ*. Esses sedimentos são geralmente mal ordenados, possuem uma estrutura menos desenvolvida e têm uma maior variação de tamanhos de partículas. Além disso, a mineralogia e a composição química dos sedimentos colúviais podem variar dependendo do tipo de rocha da qual se originam. À medida que o tempo passa e a interação com outros fatores de formação do solo ocorre, como o clima e a ação biológica, os sedimentos colúviais podem ser transformados em solos mais desenvolvidos.

A presença desses sedimentos pode influenciar a textura, a drenagem, a disponibilidade de nutrientes e a capacidade de retenção de água do solo formado. Exemplo de solos colúviais podem ser os Cambissolos, Argissolos e Neossolos Litólicos.

Os solos aluviais são formados a partir do acúmulo de sedimentos transportados pela água e depositados ao longo das margens dos corpos d'água durante eventos de inundação ou ao longo de períodos mais longos de deposição gradual. Esses sedimentos aluviais são compostos por uma mistura de partículas minerais, como areia, silte e argila, bem como matéria orgânica proveniente de plantas e animais que se decompõem nas áreas alagadas. A deposição contínua desses sedimentos resulta na formação de camadas de solo aluvial ao longo do tempo. Eles tendem a ser mais ricos em matéria orgânica devido ao acúmulo de material vegetal e à alta atividade biológica nas áreas alagadas.

Além disso, os solos aluviais geralmente possuem uma textura mais fina e uma maior capacidade de retenção de água, tornando-os adequados para a agricultura e cultivo de plantas. No entanto, a fertilidade e as características específicas do solo aluvial podem variar dependendo da composição dos sedimentos transportados pela água, da taxa de deposição e da influência de outros fatores de formação do solo, como clima e tempo. Os Neossolos Flúvicos e Cambissolos Flúvicos podem ser solos formados por sedimentos aluviais.

Os sedimentos orgânicos apresentam um teor de carbono orgânico total maior ou igual a 8% ou 80 g kg⁻¹ e são compostos por restos de plantas, animais e microrganismos que se acumulam ao longo do tempo. A deposição de sedimentos orgânicos ocorre principalmente em áreas úmidas, como pântanos, brejos e áreas alagadas, onde a decomposição da matéria orgânica é relativamente lenta devido às condições de baixo oxigênio. Além disso, em locais com baixa temperatura, independente da drenagem, a atividade dos microrganismos também diminui, contribuindo para o acúmulo de matéria orgânica.

A matéria orgânica depositada nesses sedimentos é rica em nutrientes essenciais, como carbono, nitrogênio, fósforo e outros elementos, que são liberados lentamente durante o processo de decomposição. Esses nutrientes são importantes para a fertilidade do solo e para o crescimento das plantas. À medida que a matéria orgânica se acumula, ela é transformada por microrganismos, como bactérias e fungos, em um composto chamado húmus. O húmus é uma substância escura e rica em nutrientes, que melhora a estrutura do solo, aumenta sua capacidade de retenção de água e promove a atividade biológica benéfica no solo.

Além disso, os sedimentos orgânicos contribuem para a formação de horizontes do solo, camadas distintas com diferentes características físicas e químicas. Por exemplo, a camada superior do solo, conhecida como horizonte O, é composta principalmente por matéria orgânica em diferentes estágios de decomposição. Esses solos são encontrados em áreas úmidas, como pântanos e turfeiras, e são caracterizados por sua alta fertilidade, retenção de água e capacidade de armazenar carbono. Os Organossolos de Bom Jardim da Serra-SC localizados a uma altitude de 1400 m são exemplos desses solos.

1.3.2 Clima

Os fatores climáticos, como temperatura, precipitação, evaporação, ventos, umidade e radiação solar, determinam a taxa de decomposição e intemperismo das rochas, a evaporação da água, a lixiviação de nutrientes e a atividade microbiana. O clima também afeta a vegetação e a fauna, que, por sua vez, influenciam a matéria orgânica e os processos biológicos no solo. Por isso, o clima afeta o teor de matéria orgânica, as reações químicas, a saturação por bases (eutróficos ou distróficos), a profundidade do solo e o tipo de argilomineral presente nos solos (1:1 ou 2:1).

Os solos eutróficos tem uma saturação por bases maior ou igual a 50% são ricos em nutrientes essenciais para o crescimento das plantas e possuem uma alta capacidade de retenção de água. Já os solos distróficos possuem saturação por bases menor que 50%, ou seja, apresentam baixa fertilidade.

Quando aumenta a temperatura, aumenta também a velocidade das reações químicas com acréscimo do intemperismo químico e da decomposição da matéria orgânica. A precipitação está relacionada com a hidrólise, a percolação e a lixiviação de materiais na formação dos solos.

Em clima tropical, as temperaturas elevadas aceleram os processos de intemperismo físico e químico das rochas, quebrando-as em partículas menores e facilitando a liberação de nutrientes essenciais para o solo. Além disso, as altas temperaturas e a abundante umidade presente nos climas tropicais favorecem a decomposição rápida da matéria orgânica, resultando na formação de uma camada rica em húmus no solo. A alta taxa de decomposição também leva à ciclagem de nutrientes de forma mais rápida e intensa.

A precipitação é outra característica importante dos climas tropicais. As chuvas abundantes podem lixiviar nutrientes do solo, levando à sua perda e redução da fertilidade. No entanto, a água também pode contribuir para a formação de solos tropicais por meio da deposição de sedimentos aluviais em áreas de planícies. A erosão causada pelas chuvas também pode desempenhar um papel na redistribuição de sedimentos e na formação de diferentes horizontes do solo.

Os solos formados em clima tropical geralmente são mais profundos, com mais horizontes mais intemperizados. Esses solos são normalmente distróficos e com prevalência de minerais 1:1 (caulinita e óxidos). Exemplo: Latossolos.

Em locais de clima frio e úmido, a matéria orgânica se acumula no horizonte superficial por causa das baixas temperaturas e umidade constante. A diminuição na atividade desses solos ocasiona menor intemperismo químico, sendo solos mais jovens com a sequência de horizontes incompleta, como os Neossolos (A-R ou A-C-R) ou horizontes pouco desenvolvidos como os Cambissolos com B incipiente (A-Bi-C-R). Além disso, nessas áreas é comum aparecer o horizonte hístico ou húmico sobre os solos.

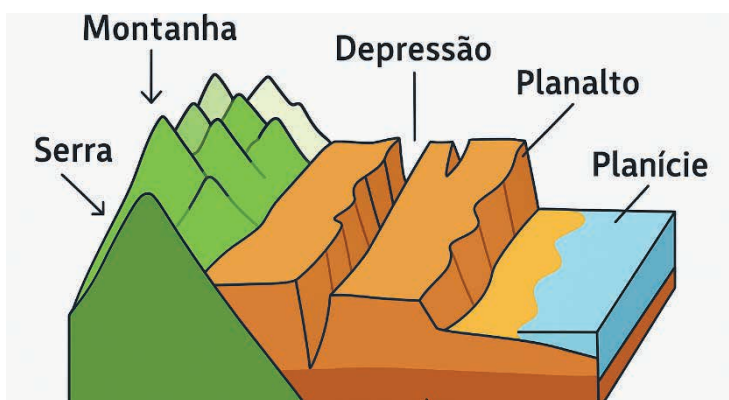
Em climas semiáridos, a precipitação é baixa e as temperaturas são altas, isso não favorece a transformação química. Por isso, são solos mais rasos com argilas 2:1, eutróficos e com mais minerais primários. Exemplos: Luvisolos e Vertissolos. Além disso, nesses locais a evaporação pode exceder a precipitação e podem ser encontrados solos salinos, como os Gleissolos Sálícos.

1.3.3 Relevo

O relevo, incluindo a inclinação, a forma e a altitude de uma área, influencia o escoamento da água, a erosão e a acumulação de sedimentos. O relevo interfere na distribuição de água no perfil do solo, por meio dos processos de infiltração, percolação e armazenamento ocorrem as alterações pedogenéticas. A distância do lençol freático e a declividade são as principais características que controlam as alterações pedogenéticas, a drenagem e a erosão dos solos.

A topografia afeta a distribuição de nutrientes, a drenagem do solo e a formação de horizontes, podendo atrasar ou acelerar a formação dos solos. Áreas com maior declive podem apresentar maior lixiviação de nutrientes e solos mais rasos. Nos pontos mais altos da paisagem em uma topossequência, normalmente estão as melhores condições de drenagem por causa da maior profundidade do lençol freático. Se o relevo for plano a suavemente ondulado com baixa declividade, a infiltração da água irá predominar (Tabela 1.5). Isso faz com que os processos de formação dos solos sejam mais intensos, formando solos mais profundos e com predominância de minerais de ferro e magnésio, gerando a cor vermelha, como exemplo nos Latossolos.

Tabela 1.5- Segmentações de um relevo



Fonte: Os autores.

Nos pontos em que há maior declividade, mesmo com boa drenagem, a infiltração de água será menor e o escoamento superficial será maior, fazendo com que ocorra mais erosão do solo e se formem solos mais rasos e jovens, como Neossolos litólicos e Cambissolos. Já nos pontos mais baixos, o lençol freático está mais próximo da superfície e a drenagem é ruim, prejudicando as reações de oxidação, por isso há a tendência de ocorrer o acúmulo de sedimentos no ambiente anaeróbico. Os Gleissolos e Organossolos são normalmente encontrados nessas áreas e as cores acinzentadas são comuns por causa dos processos de redução do ferro.

1.3.4 Organismos vivos

Os organismos vivos são essenciais para a formação do solo. Existem diferentes grupos de organismos que estão envolvidos nesse processo, incluindo plantas, animais e microrganismos.

As plantas têm um impacto significativo na formação dos solos, de forma direta ou indireta. As raízes das plantas penetram nas camadas de solo, rompendo as rochas e promovendo a fragmentação física. Além disso, as raízes liberam ácidos orgânicos e outros compostos que promovem o intemperismo químico das rochas. A cobertura vegetal também contribui com a adição de matéria orgânica ao solo através de suas folhas, galhos e raízes mortas, que se decompõem e enriquecem o solo com nutrientes, atenuando a erosão por diminuir o impacto direto das gotas de chuva sobre o solo e o escoamento superficial. Além disso, a cobertura vegetal também diminui a amplitude térmica do solo, impedindo variações bruscas de temperatura.

Vários animais desempenham um papel importante na formação dos solos. Por exemplo, minhocas e outros anelídeos contribuem para a aeração do solo através de suas atividades de escavação. Isso melhora a estrutura do solo, aumenta a infiltração de água e a circulação de ar e ajuda na homogeneização do perfil de solo. Além disso, os animais em decomposição, como insetos, vermes e microrganismos, também contribuem para a formação de matéria orgânica no solo.

Microrganismos, como bactérias, fungos e actinomicetos, desempenham um papel vital na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem de nutrientes no solo. Eles quebram os materiais orgânicos em componentes mais simples, liberando nutrientes que são posteriormente disponibilizados para as plantas. Além disso, certos microrganismos formam simbiose com as raízes das plantas, como as bactérias fixadoras de nitrogênio nas leguminosas, contribuindo para o suprimento de nutrientes para as plantas.

Os organismos do solo não trabalham de forma isolada, eles dependem de fatores como o clima e o relevo. Em climas secos com altas temperaturas, há uma menor cobertura vegetal, o que ocasiona menos intemperismo e se formam solos mais jovens. Em climas úmidos, as altas temperaturas e precipitação pluviométrica fornecem uma maior cobertura vegetal, tornando possível a formação de solos mais intemperizados e profundos.

O relevo também é importante na ação dos organismos. Nas partes mais baixas, com relevo plano e o lençol freático estando mais próximo, ocorre a formação de várzeas mal drenadas, favorecendo o desenvolvimento da vegetação higrófila com acúmulo de matéria orgânica. Em campos de altitude, o relevo é mais declivoso, favorecendo a vegetação rupestre e o acúmulo de matéria orgânica, com horizontes superficiais extensos.

A atividade dos organismos vivos promove a formação de agregados no solo, melhora a estrutura e aeração, promove a ciclagem de nutrientes e contribui para a estabilidade do ecossistema do solo. Esses processos contribuem para a infiltração de água, diminuição da erosão e diferenciação dos horizontes, como no caso das formigas e cupins na formação dos Latossolos com horizonte B espesso e homogêneo.

1.3.5 Tempo

A formação do solo é um processo gradual que ocorre ao longo de períodos de tempo consideráveis, ao longo de milhares a milhões de anos. O tempo permite a acumulação gradual de matéria orgânica, a transformação de minerais, a diferenciação de horizontes e o desenvolvimento de perfis de solo mais maduros.

O intemperismo é influenciado pelo tempo. A exposição constante das rochas às condições climáticas, como chuva, vento, temperatura e mudanças sazonais, desempenha um papel fundamental no intemperismo. Com o tempo, as rochas são gradualmente fragmentadas, alteradas quimicamente e desgastadas, formando o solo. Quanto menor for o tempo, mais características da rocha original o solo terá. Porém, em lugares com baixa precipitação, a intemperização é mais lenta, formando solos mais jovens e rasos, mesmo em longos períodos. Quanto mais os fatores de formação acelerarem o intemperismo, maiores serão as alterações no material de origem.

A acumulação de matéria orgânica no solo também é um processo que ocorre ao longo do tempo. À medida que os organismos vivos, como plantas, animais e microrganismos, depositam resíduos orgânicos no solo e morrem, a matéria orgânica se acumula. A taxa de acumulação varia dependendo do clima, do tipo de vegetação e das práticas de manejo do solo. A presença de matéria orgânica contribui para a fertilidade do solo, a retenção de umidade e a formação de agregados.

A estrutura do solo evolui ao longo do tempo à medida que ocorrem processos como compactação, agregação e desenvolvimento de poros. Com o tempo, os agregados do solo se formam, aumentando a porosidade e a capacidade de armazenamento de água. Ao longo do tempo, os horizontes do solo se desenvolvem e se diferenciam. Por exemplo, o horizonte O, também conhecido como camada orgânica, se forma com a acumulação de matéria orgânica. O horizonte B, também conhecido como horizonte de acúmulo, pode se desenvolver com a deposição de minerais e nutrientes lixiviados de camadas superiores.

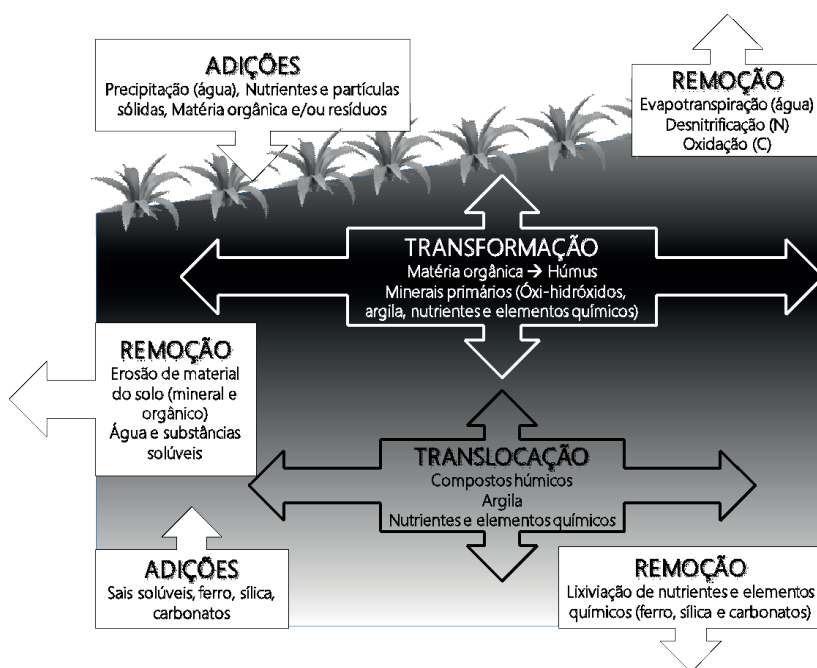
O *solum* é a parte superior, que inclui os horizontes A e B (excluído o BC) do solo e é a mais intemperizada do perfil do solo (IBGE, 2007). Solos jovens, como os Neossolos e Cambissolos, são caracterizados por horizontes pouco definidos, baixo grau de intemperismo, lixiviação limitada e um *solum* raso. Isso ocorre devido ao tempo relativamente curto de atuação dos processos de intemperismo sobre o material de origem. Por outro lado, à medida que o tempo de exposição dos processos de formação do solo sobre o material de origem aumenta, os solos se tornam mais “velhos”, como os Latossolos e Argissolos. Esses solos apresentam horizontes bem definidos e uma sequência completa de horizontes, alto grau de intemperismo, intensa lixiviação e *solum* espesso. Quando as características do solo já não variam mais com o tempo, diz-se que o solo atingiu um grau de maturidade.

1.4 PROCESSOS DE FORMAÇÃO DO SOLO

Os processos de formação do solo, processos pedogenéticos, resultam da interação dos fatores de formação (material de origem, clima, organismos vivos e relevo) agindo sobre um período. Eles ocorrem pela adição ou remoção de materiais e por translocações ou transformações no perfil de solo (Kampf; Curi, 2012).

Os processos múltiplos são os principais responsáveis pela presença dos horizontes identificáveis no solo (Kampf; Curi, 2012). Na Figura 1.10 e na Tabela 1.6, é possível observar esses processos.

Figura 1.10– Processos pedogenéticos.



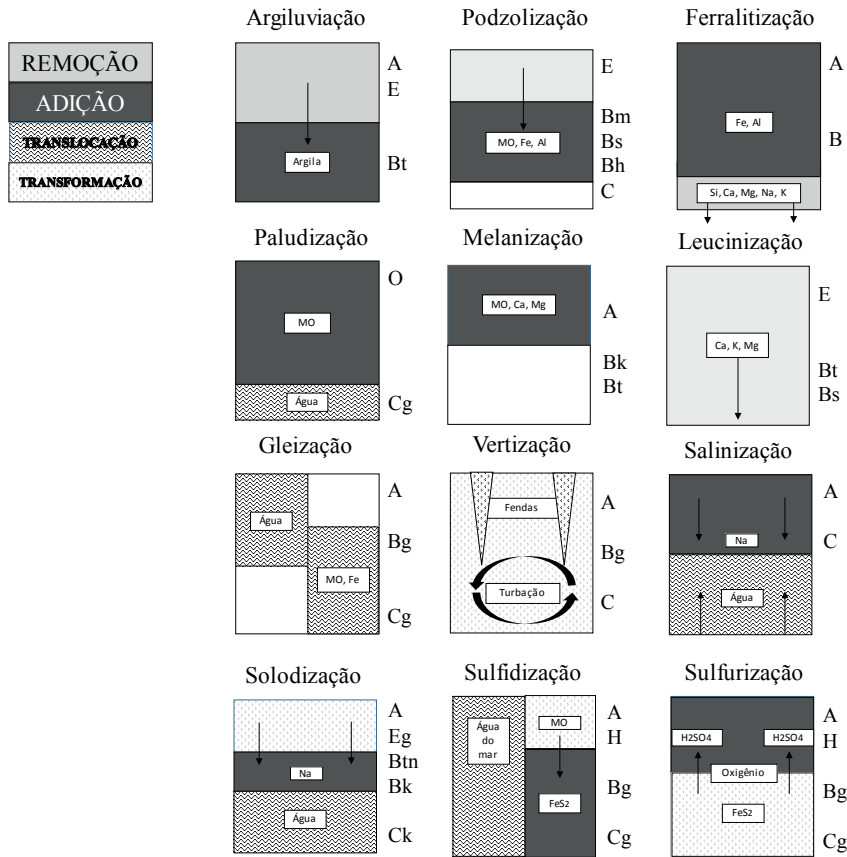
Fonte: Adaptado de Kampf e Curi, 2012.

1.5 PROCESSOS ESPECÍFICOS DE FORMAÇÃO DO SOLO

Os processos pedogenéticos específicos descrevem as transformações e alterações físicas, químicas e biológicas que ocorrem no solo ao longo do tempo, considerando as características dos diferentes tipos de solos, como resultado da atuação de mecanismos específicos na integração dos fatores de formação dos solos. Na região sul do Brasil, pode-se destacar os principais processos (Figura 1.11 e

Tabela 1.7): Latolização, Paludização, Podzolização, Gleização, Ferrólise, Melanização, Argiluviação, Plintização e Laterização, Vertização, Sulfidização e Sulfurização (Tiomorfismo) e Sodificação.

Figura 1.11- Representação esquemática dos principais processos pedogenéticos.



Fonte: Adaptado de Bockhein e Gonnadiyev (2000).

1.5.1 Ferratização ou latolização

O processo de latolização é um processo extremamente lento que ocorre em climas quentes e úmidos, onde a intensa lixiviação de nutrientes é um fator predominante. A latolização começa com a ação do intemperismo químico sobre rochas e minerais primários. A alta temperatura e a umidade aceleram a decomposição desses materiais, resultando na liberação de íons e elementos minerais solúveis. A

água da chuva, rica em dióxido de carbono (CO₂) e outros ácidos naturais, também desempenha um papel importante nesse processo de decomposição química. Conforme a água percola através do solo, ela dissolve e transporta os nutrientes solúveis para camadas mais profundas. À medida que a água carregada de nutrientes continua seu movimento para baixo, ocorre uma diminuição na concentração desses nutrientes nas camadas superiores do solo.

Tabela 1.7- Processos pedogenéticos dos solos.

Processos específicos	Processos múltiplos	Descrição resumida do processo	Exemplo de ocorrência
Ferralitização ou latolização	Remoção, transformação e translocação	Remoção de sílica e concentração de óxidos de Fe e Al.	Latossolos, Nitossolos, caráter ácrico
Plintitização e laterização	Transformação e translocação	Redução e translocação de Fe e oxidação e precipitação originando mosqueados, plintita ou petroplintita	Plintossolos
Lessivagem ou argiluviação	Translocação	Migração vertical de argila no solo	Argissolos, Luvisolos, horizontes E, lamelas
Podzolização	Transformação e translocação	Migração de complexos de Fe, Al e matéria orgânica no solo com acúmulo em horizonte iluvial, com ou sem sílica	Espodossolos, Ortstein
Gleização	Remoção, transformação e translocação	Redução de Fe em condições anaeróbias e translocação formando horizontes acinzentados com ou sem mosqueados	Gleissolos, Planossolos
Ferrólise	Remoção, transformação e translocação	Destruição de argila com formação de horizonte B textural	Planossolos, Argissolos
Salinização	Translocação	Acumulação de sais por evaporação no horizonte superficial ou na superfície do solo	Gleissolos sálcos
Sulfurização ou tiomorfismo	Transformação e translocação	Acidificação do solo causada pela oxidação de compostos de enxofre	Gleissolos Tiomórficos

Fonte: Adaptado de Kämpf e Curi (2012).

Em paralelo, ocorre a formação de óxidos de ferro e alumínio por meio da oxidação desses elementos presentes nas rochas. O ferro (Fe²⁺) é liberado dos minerais primários e, após oxidado, precipita na forma de óxidos de ferro como geothita

(FeOOH) e hematita (Fe₂O₃). Esses óxidos são altamente insolúveis e, portanto, acumulam-se nas camadas mais próximas da superfície do solo, formando horizontes enriquecidos em óxidos de ferro e alumínio. Esses horizontes são conhecidos como horizontes B latossólicos.

O processo de latossolização resulta em solos caracterizados por uma acentuada diferenciação vertical, com horizontes superficiais mais pobres em nutrientes e horizontes subsuperficiais mais ricos em óxidos de ferro e alumínio, são solos profundos, homogêneos e de cor uniforme. Esses solos tendem a ser altamente intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade natural, devido à perda acentuada do material de origem, da sílica e das bases do perfil. Pode ocorrer a dessilicação parcial, formando minerais 1:1 e óxidos (monossilização) ou a dessilicação completa com a formação de gibbsita e óxidos de ferro (alitização). Esse processo ocorre nos Latossolos e em alguns Nitossolos e Argissolos.

1.5.2 Podzolização

A podzolização é um processo pedogenético que ocorre em regiões de clima frio ou temperado, onde há uma interação entre vegetação ácida, como florestas de coníferas, e solos arenosos ou arenosos com textura fraca. É caracterizada pela intensa lixiviação de nutrientes, principalmente húmus, associado ou não à metais como Fe e Al e pela formação de horizontes distintos no perfil do solo. Esse processo é influenciado pela atividade microbiana, pela acidez da vegetação e pela percolação da água através do solo.

A primeira etapa da podzolização ocorre quando a água da chuva atravessa o solo. Durante esse processo, os ácidos orgânicos liberados pela vegetação ácida interagem com os minerais do solo, resultando na sua decomposição química e na lixiviação de elementos como cálcio, magnésio, potássio e sódio. Essa lixiviação ocorre principalmente nos horizontes superficiais do solo, levando à sua depleção de nutrientes. À medida que a água percola através do solo, ela carrega esses nutrientes lixiviados para camadas mais profundas, onde ocorre uma reação química conhecida como iluviação. Nessa etapa, os nutrientes dissolvidos na água são transportados e acumulados em horizontes subsuperficiais, formando o horizonte eluvial E. Esse horizonte pode apresentar uma coloração clara, indicando a remoção de compostos orgânicos e nutrientes solúveis.

Logo abaixo do horizonte eluvial E, ocorre a acumulação de húmus, ferro e alumínio, formando o horizonte B. Esses materiais coloidais apresentam cores mais escuras. O horizonte B é caracterizado pela presença de um processo conhecido como iluviação de argila. Nesse processo, a argila transportada pela água em solução se deposita nessa camada mais profunda do solo, formando agregados e estruturas

características. A camada mais profunda do solo, abaixo do horizonte B, é conhecida como horizonte C e é composta principalmente por material não afetado pelo processo de podzolização, como areia e fragmentos de rocha. A podzolização é o principal atuante na formação dos Espodossolos.

1.5.3 Paludização

A paludização é um processo pedogenético que ocorre em áreas com excesso de umidade, em ambientes redutores. Esse processo está associado a condições de alta saturação de água no solo, geralmente encontradas em áreas de pântanos, brejos, várzeas e áreas próximas a corpos d'água, em que os ambientes ficam permanentemente encharcados. Mas as baixas temperaturas também podem limitar a atividade microbiana que degrada a matéria orgânica para CO_2 .

A falta de oxigênio no solo resulta em processos de decomposição anaeróbica, em que a matéria orgânica se decompõe de forma lenta e incompleta, formando uma camada espessa de material orgânico parcialmente decomposto conhecida como turfa. A presença contínua de água também leva à redução da mobilidade de alguns elementos químicos, como ferro e manganês. Os organismos anaeróbios degradam o material a subprodutos orgânicos, que podem acumular e formar o horizonte hístico, que é representado pela letra O quando em ambientes frios e secos e pela letra H em ambientes hidromórficos. Exemplo: Organossolos em turfeiras.

1.5.4 Gleização

A gleização é um processo pedogenético que ocorre em ambientes hidromórficos, geralmente em áreas de clima frio ou úmido. Durante a gleização, a água fica retida no solo por períodos prolongados devido à drenagem deficiente. Isso cria condições de baixa oxigenação e favorece a decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente no solo e redução de metais como o Fe^{3+} , Mn^{3+} e Mn^{4+} . Sem a matéria orgânica não há a atividade dos microrganismos anaeróbicos heterotróficos, por isso ela é essencial nesse processo.

A presença contínua de água no solo afeta a mobilidade e a oxidação de minerais e elementos químicos. Os processos de oxidação-redução causam mudanças nas cores do solo, comumente resultando em tons cinza, com ou sem mosqueados, indicando a presença de ferro reduzido e manganês. Os mosqueados laranjas e brunados são pontos de reoxidação e precipitação do Fe^{3+} em óxidos como a hematita e a goethita. Os Gleissolos apresentam características distintas, como coloração acinzentada devido à redução do ferro, presença de camadas de material orgânico mal decomposto, baixa oxigenação, textura compactada e baixa fertilidade natural. A drenagem deficiente também pode levar ao acúmulo de sais solúveis no solo.

Existem dois tipos de Gleização comuns no sul do Brasil: pela flutuação do lençol freático nas várzeas e pela presença de camadas impermeáveis no perfil em áreas baixas ou altas (pseudo-gleização). A Gleização é o processo responsável pela formação de Gleissolos, quando há saturação permanente de água e quando há saturação temporária, pode interferir na formação dos Planossolos, Plintossolos e alguns Argissolos abrupticos. Nos Planossolos, ocorre juntamente com os processos de Argiluviação e/ou Ferrólise, formando o horizonte subsuperficial gleizado com grande contraste dos teores de argila entre os horizontes A ou E e o B. O horizonte pedogenético com intensa Gleização é denominado de Bg ou Cg.

1.5.5 Ferrólise

Ocorre por meio da dissolução do ferro a partir de reações de oxirredução, hidrólise, acidólise e dessilicação. Ocorre a destruição das argilas principalmente por ciclos de oxidação e redução em ambientes sujeitos a encharcamento e secagem alternados. Quando ocorre o encharcamento, os óxidos de Fe e Mn sofrem redução. A reoxidação durante a secagem do solo produz íons H^+ e libera Al^{3+} . Após novos ciclos de alagamento, os óxidos de Fe^{3+} são reduzidos para Fe^{2+} , deslocando o Al^{3+} , que precipita como $Al(OH)_3$ (Equações 6 e 7).



Durante a ferrólise, os minerais de ferro sofrem oxidação, resultando na formação de óxidos de ferro, como a goethita e a hematita. Esses óxidos de ferro podem conferir aos solos uma coloração avermelhada ou amarelada, dependendo da quantidade e tipo de óxido presente. Além disso, produtos intermediários como polímeros de $Al-OH$ podem ser formados, precipitando nas entrecamadas de minerais 2:1, como na esmectita e vermiculita, diminuindo a CTC do solo.

A ferrólise ocorre de maneira mais intensa em ambientes tropicais e subtropicais, onde as altas temperaturas e as chuvas frequentes favorecem a atividade microbiana e a oxidação do ferro. Essa decomposição e alteração dos minerais de ferro contribuem para a formação de horizontes subsuperficiais ricos em óxidos de ferro, conhecidos como horizontes B, que podem ocorrer em diferentes perfis de solo. Além disso, os óxidos de ferro formados na ferrólise têm a capacidade de adsorver e reter nutrientes, como fósforo, potássio e outros cátions, influenciando sua disponibilidade para as plantas.

Os solos originados têm horizonte superficial eluvial menos argiloso, mais ácido e com a cor clara sob um horizonte subsuperficial com mais argila e menos ácido (A-E-Bt). Esse processo de ferrólise pode ser observado nos Plintossolos, Planossolos e alguns Argissolos e pode estar associado à gleização.

1.5.6 Melanização

A melanização caracteriza-se pela acumulação de matéria orgânica no solo, especialmente na forma de húmus. É um processo comum em solos florestais e ocorre principalmente em áreas com vegetação densa e rica em resíduos vegetais. Durante a melanização, a matéria orgânica presente no solo sofre decomposição parcial por microrganismos do solo, resultando na formação de húmus.

A melanização é influenciada pela quantidade e qualidade da matéria orgânica presente no solo, bem como pelas condições ambientais, como temperatura e umidade. Em geral, solos com alta quantidade de resíduos vegetais, como folhas e restos de plantas, tendem a ser mais melanizados. Solos melanizados são geralmente mais escuros, variando de tons castanhos a pretos, o que ajuda a absorver e reter calor, contribuindo para um microclima mais quente no solo. Além disso, a matéria orgânica melanizada melhora a estrutura do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e a capacidade de troca catiônica.

Esse processo de melanização pode ser observado nos horizontes chernozênicos desenvolvidos em regiões com alta retenção de cátions básicos, principalmente o Ca e nos horizontes proeminentes desenvolvidos em solos altamente lixiviantes e distróficos.

1.5.7 Argiluviação ou lessivagem

A argiluviação, também conhecida como lessivagem, é caracterizada pela movimentação e acumulação de partículas de argila nos horizontes subsuperficiais. Esse processo está relacionado à lixiviação de argila e outros materiais finos de horizontes superiores e sua subsequente deposição em camadas mais profundas do solo. A argiluviação é influenciada principalmente pela percolação da água através do solo. À medida que a água se move verticalmente pelo perfil do solo, ela transporta partículas finas, como argila, silte e matéria orgânica dissolvida. Em camadas mais superficiais do solo, onde ocorre a ação de processos de intemperismo e decomposição, ocorre a lixiviação dessas partículas e solutos, resultando na formação de horizontes mais claros, o horizonte eluvial (E), que perdeu material.

Nas camadas mais profundas, a velocidade de fluxo diminui e ocorre uma desaceleração do processo de lixiviação. Isso permite a deposição das partículas de argila e outros materiais finos no horizonte subsuperficial, que ganha material e

é conhecido como horizonte iluvial (B). Nesse horizonte, ocorre a acumulação de argila, resultando em uma textura mais argilosa em comparação aos horizontes superiores do solo. Ocorre a translocação de coloides minerais (argilossilicatos e óxidos) dos horizontes A e E para o B, formando o horizonte B textural.

A movimentação da argila pode afetar a estrutura do solo, promovendo a formação de agregados e a estabilização de poros. Em áreas com alta precipitação, solos bem drenados e textura mais arenosa, a argiluviação tende a ser mais acentuada.

1.5.8 Plintização e lateralização

A plintização refere-se à formação de camadas endurecidas no perfil do solo. Essas camadas endurecidas são conhecidas como plintitas ou petroplintitas e são compostas por materiais cimentados, como óxidos de ferro, óxidos de alumínio, sílica amorfa e argila. A plintização ocorre devido à concentração e acumulação desses materiais ao longo do tempo, geralmente nas camadas mais profundas do solo. Essas camadas endurecidas podem ter diferentes formas e tamanhos, como placas, blocos ou estruturas prismáticas.

A plintita é uma mistura de argila com quartzo e outros minerais, pobre em matéria orgânica e rica em ferro. A plintita pode ser destacada da massa do solo e não esboroa quando imersa em água por menos de 2 horas. Nas áreas superiores do perfil do solo, os ciclos de umedecimento e secamento são mais intensos, permitindo a oxidação do Fe e o endurecimento permanente. A plintita e a petroplintita podem estar presentes no mesmo perfil, sendo comum a plintita ocorrer abaixo da petroplintita. A plintita ocorre em posições onde há o escoamento lento, alagamento temporário ou movimento lateral de água no solo. A plintita pode se formar de forma mais rápida do que a petroplintita, que pode levar milhões de anos.

A lateralização refere-se à acumulação de materiais minerais ou orgânicos em uma determinada posição ou lateral do perfil do solo. Esse processo ocorre devido à movimentação vertical de partículas, como argila, silte, óxidos de ferro e matéria orgânica, ao longo do perfil do solo. A lateralização é influenciada principalmente pela percolação da água e pelo transporte de partículas finas no perfil do solo. Em solos com lateralização, é comum observar a formação de horizontes ou camadas de deposição lateral. Essas camadas podem apresentar características diferentes dos horizontes adjacentes, como uma textura diferente, maior concentração de materiais finos ou acúmulo de matéria orgânica. A lateralização pode ocorrer em diferentes direções no perfil do solo, dependendo dos processos de transporte e deposição.

Os Plintossolos têm teores de plintita acima de 15% com horizonte diagnóstico plíntico (Bf ou Cf). No horizonte litoplíntico predominam os blocos de protoplintita superiores a 20 cm ao longo do perfil, o que restringe o crescimento de raízes.

1.5.9 Pedoturbação

A vertização ou pedoturbação envolve a movimentação e mistura de materiais do solo por contração e expansão das argilas (pedoturbação) ou por meio da atividade de organismos escavadores, como minhocas, cupins, formigas e outros insetos (bioturbação).

As argilas 2:1 expansivas do solo passam por ciclos de umedecimento e secagem, o que ocasiona, respectivamente, a expansão e contração do solo, formando os horizontes vérticos nos Vertissolos. Na maioria dos Vertissolos, os horizontes superficiais são escuros com teores de matéria orgânica baixos (0,5 a 3%), mas a associação entre a esmectita e a matéria orgânica desenvolve essa coloração.

Os organismos têm a capacidade de cavar galerias e túneis no solo, promovendo a mistura de diferentes horizontes e camadas. Durante a vertização, os organismos escavadores deslocam o material do solo de camadas mais profundas para camadas mais superficiais, e vice-versa, por meio de suas atividades de escavação, alimentação e reprodução. Essa movimentação e mistura de materiais resulta em alterações na estrutura, textura e composição do solo. Os túneis e galerias criados pelos organismos escavadores facilitam a penetração de ar e água no solo, melhorando a aeração e a drenagem. Além disso, os organismos escavadores transportam e misturam diferentes partículas, promovendo a formação de estruturas agregadas mais estáveis.

Os organismos escavadores ingerem material orgânico e depositam excrementos nas galerias, o que contribui para a decomposição e liberação de nutrientes para as plantas. A movimentação de material do solo pode levar à redistribuição de nutrientes em diferentes camadas, afetando a disponibilidade para as plantas.

1.5.10 Sulfidização e sulfurização

A sulfidização e sulfurização são processos relacionados à presença e transformação de compostos de enxofre no solo.

A sulfidização ocorre quando há uma concentração significativa de enxofre no solo, geralmente na forma de sulfetos. Esses sulfetos podem ser resultantes da redução de compostos de enxofre presentes nas rochas ou da decomposição de matéria orgânica contendo enxofre. A presença de sulfetos pode conferir ao solo um odor característico de ovo podre devido à liberação de gás sulfídrico (H_2S) durante a decomposição anaeróbica. Esse processo está associado a solos mal drenados e com baixa oxigenação, como pântanos e áreas alagadas.

Nessas condições, ocorre a redução de sulfatos (SO_4^{2-}) presentes no solo, produzindo sulfetos (geralmente sulfetos de ferro, como pirita - FeS_2). A presença de sulfetos pode afetar negativamente a fertilidade do solo, pois o gás sulfídrico é tóxico para as plantas, inibindo seu crescimento e desenvolvimento.

Já a sulfuração refere-se à oxidação de materiais sulfídricos, como a pirita, liberando Fe^{2+} , SO_4^{2-} e H^+ na solução do solo. Em situações extremas, o Fe^{2+} passa para Fe^{3+} e libera H^+ e H_2SO_4 causando a acidificação intensa do solo. Esse processo pode ocorrer em áreas de drenagem de mangues, na exposição de sedimentos piritosos na mineração ou pela incorporação de rejeitos com sulfetos no solo. A contaminação por pirita ocasiona a acidificação do solo, aumenta o teor de Al e Mn, a intemperização e a lixiviação de bases.

Os Gleissolos Tiomórficos e Organossolos Tiomórficos são solos que apresentam horizonte sulfúrico em até 100 cm de profundidade.

1.5.11 Sodificação ou solodização

A sodificação ou solodização ocorre por causa do acúmulo excessivo de sais solúveis de sódio no solo. Esse acúmulo ocorre devido à alta concentração de íons de sódio (Na^+) em relação a outros cátions no solo, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Esse processo pode ocorrer naturalmente em áreas com baixa precipitação, onde a evaporação da água é maior do que a quantidade de água que entra no solo por meio da precipitação. A irrigação excessiva e inadequada também pode levar à sodificação do solo, pois a água aplicada contém íons de sódio que se acumulam à medida que a água evapora.

Enquanto os sais solúveis estiverem presentes, o pH fica abaixo de 8,5 e o efeito flocculante faz com que a estrutura e a permeabilidade dos solos sejam mantidas. Quando os sais são lixiviados, o Na^+ permanece, o pH sobe para 8,5 a 10 e ocorre a dispersão e transladação da argila, formando camadas impermeáveis subsuperficiais, o horizonte B nátrico. A matéria orgânica também é dispersa e ocasiona o escurecimento do solo.

Os solos sódicos são caracterizados por apresentarem 15% de saturação de Na^+ , que é um nível crítico, pois 10% de Na^+ já prejudica a estrutura do solo. Solos com caráter solódico apresentam de 6 a 15% de saturação pôr Na^+ . Planossolos, Gleissolos, Organossolos, Vertissolos, Cambissolos Flúvicos, Cambissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos podem apresentar essas características.

A presença excessiva de sais de sódio no solo afeta negativamente suas propriedades físicas, químicas e biológicas. O sódio excessivo interfere na formação de agregados do solo, resultando em uma estrutura dispersa e pulverulenta. Isso afeta a porosidade do solo, reduzindo sua capacidade de retenção de água e dificultando a penetração das raízes das plantas. Pode levar também à compactação do solo, tornando-o menos poroso e dificultando a infiltração de água. O sódio em excesso interfere na absorção de nutrientes pelas plantas, prejudicando seu crescimento e desenvolvimento.

1.5.12 Leucinização

É um processo que envolve a remoção ou perda de material mineral ou orgânico solúvel do solo, resultando em um acúmulo de minerais insolúveis e de baixa atividade coloidal nas camadas mais superficiais do perfil do solo. A leucinização ocorre principalmente em solos bem drenados, com alta precipitação e em áreas de relevo plano ou suavemente inclinado.

Durante a leucinização, a água de percolação carrega consigo compostos solúveis, como íons de cálcio, magnésio, potássio, sílica e outros nutrientes. Esses compostos são transportados para camadas mais profundas do solo, enquanto as camadas superficiais sofrem uma redução desses elementos solúveis. Como resultado desse processo, os solos leucinizados geralmente apresentam uma camada superficial mais clara, com baixa fertilidade natural e baixa capacidade de retenção de nutrientes.

Além disso, tendem a ser ácidos devido à remoção de bases solúveis. A matéria orgânica e os cátions do solo são removidos por lixiviação, formando o horizonte E com cores claras e baixa atividade.

TESTE SEU CONHECIMENTO ☺

- 1) Quais são os três grupos principais em que as rochas podem ser classificadas?
 - a) Magmáticas, metalúrgicas e sedimentares
 - b) Magnéticas, metamórficas e sedimentares
 - c) Magmáticas, metamórficas e sedimentares
 - d) Magmáticas, metamórficas e rudimentares
 - e) Magnéticas, carboníferas e metamórficas

- 2) A classificação das rochas em leucocrática, melanocrática e mesocrática é realizada com base em qual característica apresentada pelas rochas e está relacionada a qual aspecto de sua composição?
 - a) Coloração e teor de Fe
 - b) Formato e minerais
 - c) Textura e teor de Al
 - d) Coloração e minerais
 - e) Textura e teor de Fe

3) As rochas magmáticas são formadas pela solidificação do magma. Esta pode ocorrer diretamente na superfície da terra, em fendas e fissuras ou ainda sob a crosta terrestre. Dessa forma, as rochas magmáticas podem ser classificadas de acordo com o local em que ocorre a solidificação em:

- a) Extrusivas e intrusivas
- b) Eruptivas e interiores
- c) Vulcânicas e graníticas
- d) Magmáticas e metamórficas
- e) Plutônicas e sedimentares

4) A formação de solo ocorre a partir das rochas através dos processos de intemperismos. O intemperismo pode ser dividido, de acordo com suas características, em físico, químico e biológico. São exemplos, respectivamente:

- a) Crescimento de raízes, hidrólise de minerais e compactação
- b) Contração e retração devido a temperatura, hidrólise de minerais e liberação de exsudatos radiculares
- c) Infiltração de água, reações de neutralização e deslocamento da fauna
- d) Crescimento de raízes, reações de neutralização e consumo de matéria orgânica
- e) Infiltração de água, reações de neutralização e movimentação dos microrganismos

5) De acordo com o Dokuchaev quais são os cinco fatores de formação do solo:

- a) Rochas, relevo, clima, microrganismos e tempo
- b) Rochas, relevo, chuva, organismos vivos e tempo
- c) Material de origem, encostas, chuva, organismos vivos e tempo
- d) Material de origem, relevo, clima, organismos vivos e tempo
- e) Material de origem, encostas, chuva, microrganismos e tempo

6) O que é intemperismo?

- a) Conjunto de processos antrópicos que resultam na decomposição e alteração das rochas e outros materiais
- b) Conjunto de processos naturais que resultam na formação e deposição das rochas e outros materiais

- c) Conjunto de processos promovidos pela chuva que resultam na dissolução de compostos orgânicos e outros materiais
- d) Sequência de eventos em cadeia que resultam na decomposição de materiais presentes no solo
- e) Conjunto de processos naturais que resultam na decomposição e alteração das rochas e outros materiais

7) Os processos pedogenéticos resultam da interação dos fatores de formação (material de origem, clima, organismos vivos e relevo reagindo sob um período). Estes processos podem ser classificados de acordo com a ação que desempenham, são eles:

- a) Adição, redução, transporte e transformação
- b) Adição, remoção, translocação e transformação
- c) Soma, redução, translocação e mutação
- d) Adição, remoção, translocamento e transporte
- e) Soma, redução, transporte e transfiguração

8) Os processos pedogenéticos específicos descrevem as alterações físicas, químicas e biológicas que ocorrem ao longo do tempo, considerando as diferentes características atribuídas ao solo como resultado desses processos. Mais de um processo pode ocorrer simultaneamente, conferindo atributos e formando diferentes tipos de solo. São exemplos de processos pedogenéticos específicos:

- a) Melanização, latolização, podzolização e eutrofização
- b) Argiluviação, gleização, arenização e plintização
- c) Ferrólise, vertização, lixiviação e laterização
- d) Argiluviação, gleização, podzolização e latolização
- e) Intemperismo, ferrólise, latolização e argiluviação

9) consiste num processo extremamente lento, favorecido por climas quentes e úmidos em que pode ocorrer intensa lixiviação de nutrientes no perfil de solo. Tem como principais características a formação de solos profundos, ricos em óxidos e minerais 1:1 como a caulinita em menor concentração. Estes solos apresentam cor uniforme no perfil e devido a intensa perda de nutrientes tendem a serem ácidos e de baixa fertilidade natural. O processo a que se refere é:

- a) Latolização

- b) Laterização
- c) Argiluviação
- d) Melanização
- e) Plintização

10) Os processos pedogenéticos específicos estão relacionados aos processos de adição, remoção, translocação e transformação. Entre os processos que envolvem a translocação de materiais, pode-se ter a movimentação das argilas no perfil de solo ou ainda a movimentação vertical de matéria orgânica complexada com metais, resultando em dois processos específicos. São eles, respectivamente:

- a) Plintização e paludização
- b) Laterização e melanização
- c) Argiluviação e podzolização
- d) Sulfurização e gleização
- e) Salinização e latolização

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOCKHEIM, Jsmes G.; GENNADIVEV, Alexander. N. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. **Geoderma**, 95(1-2), 53-72, 2000.

CRESSER, Malcolm; KILLHAM, Ken; EDWARDS, Tony. **Soil chemistry and its applications**. Cambridge University Press, 1993.

CURI, Nilson; KER, João Carlos; NOVAIS, Roberto Ferreira; VIDAL-TORRADO, Pablo; SCHEFER, Carlos Ernesto G. R. **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 597 p. 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro, 2007.

JENNY, Hans. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. Courier Corporation, 1994.

KÄMPF, Nestor; CURI, Nilton. Formação e evolução do solo (Pedogênese). In: KER, João Carlos; CURI, Nilson; SCHEFER, Carlos Ernesto G. R.; VIDAL-TORRADO, Pablo. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 207-302, 2012.

KER, João Carlos; CURI, Nilson; SCHEFER, Carlos Ernesto G. R.; VIDAL-TORRADO, Pablo. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 343 p., 2012.

LEPSCH, Igor F. **19 lições de pedologia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2021.

OLIVEIRA, Luiz CA; FABRIS, José D.; PEREIRA, Márcio C. Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. **Química Nova**, v. 36, p. 123-130, 2013.

TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, Maria Cristina Mendes; FAIRCHILD, Thomas Rich; TAIOLI, Fabio (orgs.). **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.



CAPÍTULO 2

QUÍMICA DO SOLO

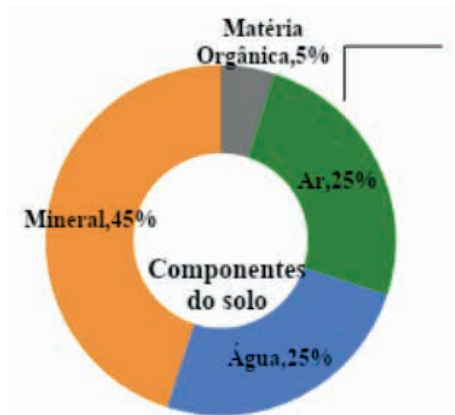
Caroline Aparecida Matias Pierezan

Juliana Maria Castilho Diniz

2.1 CONSTITUINTES DO SOLO

O solo é uma mistura variável de matéria mineral, matéria orgânica, água e ar (Figura 2.1), formando um sistema de fases sólida, líquida e gasosa, cujas proporções variam entre solos a depender do material de origem e das condições climáticas.

Figura 2.1- Proporção das fases sólida (mineral e matéria orgânica), líquida (água) e gasosa (ar) de um solo



Fonte: Adaptado de Meuer (2004).

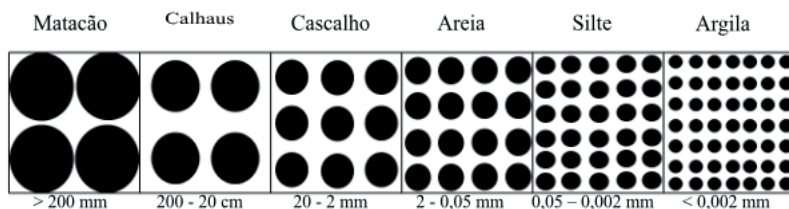
2.1.1 Fase sólida

A fase sólida representa aproximadamente 50% do volume do solo, sendo constituída por matéria orgânica (sólidos orgânicos) e matéria mineral (sólidos inorgânicos).

A matéria orgânica é formada pelo processo de decomposição e humificação dos resíduos vegetais e animais, sendo fonte de nutrientes para plantas e organismos do solo. O acúmulo de matéria orgânica no solo geralmente é pequeno ($\leq 5\%$ do volume do solo) e concentra-se nas primeiras camadas, sendo dependente de fatores como clima, vegetação, textura, umidade e uso do solo (Meurer, 2004).

Por sua vez, a matéria mineral é predominante nos solos, sendo representada por fragmentos de rochas e minerais com tamanhos e formas variáveis, classificadas em frações granulométricas com base no seu diâmetro (Figura 2.2).

Figura 2.2- Escala de frações granulométricas de partículas encontradas na fase sólida mineral do solo.



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2013).

2.1.2 Fase líquida

A fase líquida é denominada como solução do solo, sendo constituída por água oriunda da precipitação (chuva, granizo, neve e nevoeiro) e por água subterrânea. Ainda, são encontrados na solução do solo minerais, compostos orgânicos dissolvidos e gases encontrados no solo.

Em geral, a água ocupa os microporos no solo (diâmetro $< 0,05$ mm). Entretanto, após períodos de chuva intensa, os macroporos (diâmetro $> 0,05$ mm) também são ocupados. Na sequência, a água encontrada nos macroporos é drenada para o lençol freático em resposta à ação da gravidade. Por sua vez, a água presente nos microporos não é removida pela gravidade, estando disponível para as plantas e para os organismos do solo. Também pode ocorrer o processo de evaporação, substituindo a presença de água nos microporos por ar (Lopes, 2017).

2.1.3 Fase gasosa

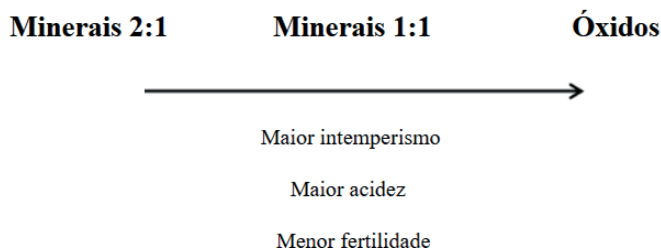
Os constituintes gasosos do solo concentram-se principalmente nos macroporos e derivam da atmosfera, evaporação da umidade do solo, respiração e metabolismo dos organismos presentes no solo.

A constituição da fase gasosa no solo é semelhante ao ar atmosférico, distinguindo-se na concentração em razão da difusibilidade do solo e ao processo de respiração realizado por raízes e organismos. No ar atmosférico observa-se 21% de O_2 e 0,03% de CO_2 , enquanto no solo, o teor de O_2 varia entre 15% e 20% e o teor de CO_2 entre 0,25% a 5% (Silva, 2020).

2.2 MINERAIS SECUNDÁRIOS

Os minerais secundários constituem-se nos principais componentes da fração argila do solo, originados a partir do processo de intemperismo dos minerais primários, formando argilominerais do tipo 2:1 e 1:1 e óxidos (Figura 2.3) (Vezzani; Mielniczuk, 2011).

Figura 2.3- Evolução do grau de intemperismo dos minerais secundários do solo.



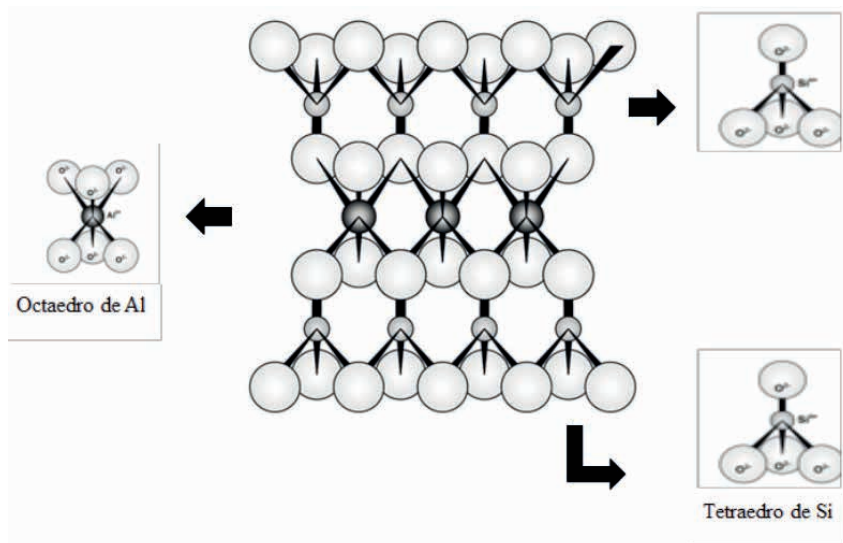
Fonte: Adaptado de Vezzani e Mielniczuk (2011).

Os argilominerais são o grupo mais relevante de minerais secundários presente no solo. A sua composição, quantidade e distribuição variam de acordo com o material de origem, as condições ambientais de formação e os fatores de intemperismo envolvidos no processo.

2.2.1 Minerais do tipo 2:1

Os filossilicatos do tipo 2:1 como vermiculitas e esmectitas são formados por uma folha octaédrica de Al intercalada entre duas folhas tetraédricas de Si (Figura 2.4) encontrados em solos com menor grau de intemperismo, como vertissolos e neossolos, conferindo-lhes alta fertilidade natural, baixa friabilidade e alta plasticidade (Meurer, 2004; Rodrigues, 2018).

Figura 2.4- Estrutura de minerais secundários do tipo 2:1.



Fonte: Adaptado de Cresser; Killham e Edwards (1993).

2.2.1.1 Vermiculita

A vermiculita é originada de minerais hidratados de mica, apresentando capacidade de expansão de até 15 vezes seu volume original quando submetida a elevadas temperaturas. Este processo de expansão deve-se à liberação da água retida nas camadas internas do mineral, resultando em um material leve, poroso e de alta capacidade de retenção de água e nutrientes.

Na agricultura, a vermiculita é amplamente utilizada como um componente de substratos para plantas, contribuindo para aeração do solo, retenção de umidade e fornecimento de nutrientes essenciais às plantas.

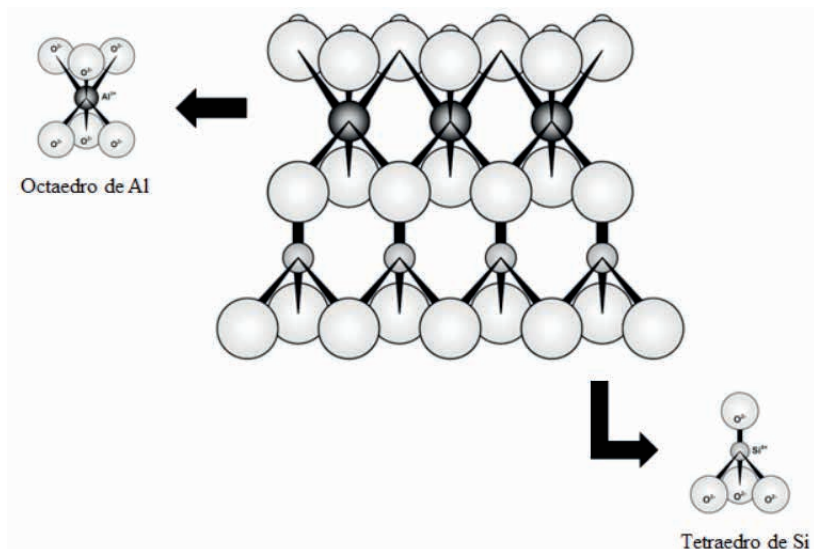
2.2.1.2 Esmectita

No grupo das esmectitas o principal representante é a montmorilonita. Apresenta alta substituição isomórfica de Si^{4+} por Al^{3+} nas lâminas tetraedrais e de Fe^{3+} por Mg^{2+} ou Fe^{2+} nas lâminas octaedrais. Isso resulta em um espaçamento basal variável entre 9,6 a 18 Å e uma capacidade de troca de cátions significativa. Os solos com presença significativa de montmorilonita tendem a ser altamente pegajosos e plásticos.

2.2.2 Minerais do tipo 1:1

Os filossilicatos do tipo 1:1 compreendem uma estrutura cristalina formada por uma lâmina de tetraedro de Si e uma lâmina de octaedro de Al (Figura 2.5). São comumente encontrados em solos altamente intemperizados, como argissolos, latossolos e nitossolos (Meurer, 2004; Rodrigues, 2018).

Figura 2.5- Estrutura de minerais secundários do tipo 1:1.



Fonte: Adaptado de Cresser; Killham; Edwards (1993).

2.2.2.1 Caulinita

A caulinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, apresenta baixa CTC e amplamente encontrado em solos altamente intemperizados, principalmente em solo de regiões tropicais e subtropicais, nos quais ocorre a lixiviação acentuada de bases do material de origem. Os minerais que podem dar origem à caulinita incluem olivinas, micas, piroxênios, plagioclásios e feldspatos alcalinos.

Os minerais do grupo da caulinita apresentam estrutura é composta por uma lâmina de tetraedros de Si e outra de octaedros de Al. São tipicamente pouco expansivos devido à falta de hidratação das camadas estruturais, o que resulta em espaçamento basal de 7,2 Å e uma adsorção superficial reduzida. A estrutura praticamente eletricamente neutra da caulinita limita a ocorrência de substituição isomórfica, embora em variedades menos cristalinas possam ocorrer pequenas substituições.

2.2.3 Óxidos

Os óxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsita) são os resultados do processo de intemperismo, no qual a maioria dos íons foi lixiviada (Rodrigues, 2018).

- I **Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$):** É formada a partir da decomposição dos aluminossilicatos presentes no material de origem, isto é, ocorre a liberação de alumínio para a solução do solo, formando géis amorfos que se cristalizam ao perderem água, formando a gibbsita;
- I **Hematita (Fe_2O_3):** Consiste na forma oxidada e desidratada do Fe, sendo derivada de material de origem rico em minerais ferro-magnesianos. Apresenta forma hexagonal e confere aos solos uma coloração tipicamente avermelhada;
- I **Goethita (FeOOH):** Compreende a forma oxidada e hidratada do Fe, sendo uma estrutura mais estável que a hematita. A formação da goethita está relacionada a climas úmidos com drenagem restrita e em solos pobres em Fe. Seus cristais apresentam forma acicular e imprime uma coloração brunada ou amarelada aos solos.

2.2.4 Função dos minerais secundários no solo

Os minerais secundários desempenham funções essenciais nos solos, influenciando uma série de processos físicos, químicos e biológicos. Entre suas principais funções destacam-se:

- I **Capacidade de Troca de Cátions:** Muitos minerais secundários, como as argilas, têm a capacidade de reter íons nutrientes, como Ca, Mg, K e entre outros na superfície de suas partículas. Isso os torna reservatórios importantes de nutrientes para as plantas, liberando-os conforme necessário;
- I **Estabilidade de Agregados:** A presença de minerais secundários contribui para a formação e estabilidade de agregados no solo, o que melhora sua estrutura e favorece a infiltração de água e o desenvolvimento radicular;
- I **Retenção de Água:** A estrutura porosa dos minerais secundários permite a retenção de água no solo, tornando-a disponível para as plantas durante períodos de seca ou escassez de água;
- I **Adsorção de Poluentes:** Alguns minerais secundários têm a capacidade de adsorver poluentes orgânicos e inorgânicos do solo, ajudando a melhorar sua qualidade e reduzir os impactos ambientais negativos;
- I **Favorecimento da Atividade Biológica:** Muitos minerais secundários fornecem superfícies para a fixação de microrganismos benéficos, como bactérias fixadoras de nitrogênio e micorrizas, promovendo a saúde do solo e das plantas.

Em resumo, os minerais secundários desempenham funções diversas e interconectadas no solo. Seu estudo e compreensão são essenciais para o manejo sustentável dos recursos naturais e para o desenvolvimento de práticas agrícolas e ambientais mais eficientes e responsáveis.

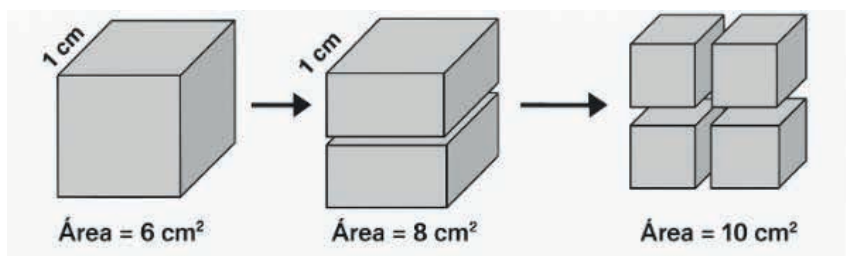
2.3. PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO

A fração argila é a sede dos fenômenos químicos e físico-químicos do solo, devido à sua natureza coloidal. Essa fração coloidal é altamente heterogênea e compreende partículas de diferentes espécies minerais. Logo, as argilas apresentam propriedades distintas, como granulometria, área superficial, capacidade de troca iônica e viscosidade (Meurer, 2004).

2.3.1 Área superficial específica

A área superficial específica (ASE) é uma medida crucial na caracterização dos minerais do solo, sendo expressa como a relação entre a área superficial absoluta de um sólido e sua massa ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) (Figura 2.6). Esse parâmetro é fundamental porque determina a extensão das interações entre a fase sólida e as fases líquida e gasosa em um sistema (Cessa et al. 2009).

Figura 2.6- Aumento da área superficial específica de um cubo com sua divisão em unidades menores.



Fonte: Os autores.

A magnitude da ASE depende do tamanho e do tipo de minerais presentes no solo (Tabela 2.1), sendo diretamente proporcional ao com a redução do diâmetro, isto é, partículas menores apresentam maior ASE.

Tabela 2.1- Área superficial específica para diferentes frações e minerais do solo.

Fração	Mineralogia	Diâmetro	ASE
-	-	mm	m ² g ⁻¹
Areia Grossa	Quartzo	2,0 – 0,2	0,01
Areia Fina	Quartzo	0,2 – 0,05	0,1
Silte	Minerais Primários	0,05 – 0,002	1
Argila	Minerais Secundários	< 0,002	5 - 800

Fonte: Cessa et al. (2009).

2.3.2 Cargas elétricas

Em solos, as partículas coloidais, como argilas e óxidos, exibem grupos funcionais que interagem com a solução do solo, promovendo desequilíbrios eletrônicos na forma de cargas elétricas positivas ou negativas.

As cargas negativas podem ser classificadas como permanentes ou dependentes do pH. As cargas elétricas permanentes são especialmente relevantes em argilominerais do tipo 2:1, onde surgem devido a substituições isomórficas durante a formação do mineral. Nessas substituições, como a troca de Al por Si nas lâminas tetraédricas e de Al por Mg nas lâminas octaédricas, resultam em um desequilíbrio de cargas positivas devido às menores valências do Al e Mg em relação ao Si e Al, respectivamente. Isso gera um excesso de cargas negativas distribuídas nas partículas.

Por outro lado, as cargas negativas dependentes do pH se concentram nas bordas dos argilominerais e na superfície de óxidos e matéria orgânica. Essas cargas são mais proeminentes em solos tropicais, onde as argilas do tipo 1:1 e os óxidos de Fe e Al são prevalentes no sistema coloidal. Como a quantidade de cargas permanentes é baixa nesses solos, a matéria orgânica se torna a principal fonte de cargas negativas, especialmente em solos ácidos.

2.3.3 Mecanismos de sorção

Os cátions no solo podem ser adsorvidos através de adsorção específica (ligações químicas de alta energia) ou adsorção não específica (ligação física de baixa energia). A adsorção específica envolve reações mais complexas, sendo predominante na retenção de metais como Al, Cu e Zn, especialmente na presença de argilominerais do tipo 2:1. Enquanto a adsorção não específica envolve, principalmente, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺ e Na²⁺, os quais são atraídos pelas cargas negativas dos coloides do solo (Meurer, 2004).

A quantidade de cátions que um solo é capaz de reter é conhecida como capacidade de troca de cátions (CTC), uma propriedade essencial para avaliar a fertilidade do solo. A interação entre a fase líquida e sólida coloidal é crucial nesse processo, que permite que nutrientes fiquem disponíveis para as plantas, mas ao mesmo tempo evita que sejam lavados pela água infiltrada no solo. Logo, as cargas elétricas presentes nos colóides do solo são responsáveis pela adsorção de íons. Normalmente, predominam as cargas negativas, e a quantidade de cátions adsorvidos é muito maior do que aqueles presentes na fase líquida.

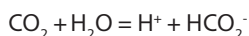
A adsorção de ânions, por sua vez, ocorre por meio de adsorção não específica ou física e adsorção específica com ligações químicas de alta energia. Enquanto os ânions como NO_3^- e Cl^- são fracamente adsorvidos e tendem a migrar para o lençol freático, íons como fosfato e sulfato podem formar ligações químicas mais fortes, especialmente em solos intemperizados ricos em caulinita e óxidos. Esse processo pode comprometer a disponibilidade desses nutrientes para as plantas, especialmente em solos tropicais ácidos.

Ainda, os mecanismos de sorção são influenciados por diversos fatores, como a valência do cátion ou do ânion, sua hidratação, concentração na solução do solo, tamanho e seletividade do colóide, entre outros.

2.4 ACIDEZ, ALCALINIDADE E SALINIDADE DO SOLO

2.4.1 Acidez e alcalinidade do solo

A acidez é um fator determinante à fertilidade, pois influencia na disponibilidade de nutrientes, na atividade dos microrganismos e no crescimento das raízes. O início da acidez do solo consiste na reação do gás carbônico com a água na atmosfera (Ernani, 2016).



Ainda, além de processos complexos naturais, a acidez do solo também decorre de processos antrópicos. Em síntese, estão entre as principais causas naturais e/ou antrópicas a composição do material de origem, a ação de agentes externos, a decomposição da matéria orgânica (MO) e as práticas agrícolas.

- I **Material de Origem:** Os solos podem ser naturalmente ácidos em função da baixa quantidade de bases do material de origem. Rochas ricas em minerais ácidos, como feldspato, podem contribuir para solos naturalmente ácidos. Ainda, processos de formação que favorecem a remoção de elementos básicos como K, Ca, Mg, Na e entre outros.

- I **Agentes externos:** A precipitação pode influenciar na acidez do solo, pois chuvas intensas e frequentes podem causar percolação de íons alcalinos do solo, aumentando sua acidez.
- I **Matéria Orgânica:** A decomposição dos resíduos vegetais pelo processo de mineralização e formação de substâncias húmicas também é uma fonte importante de acidez no solo, conforme vista no esquema abaixo:



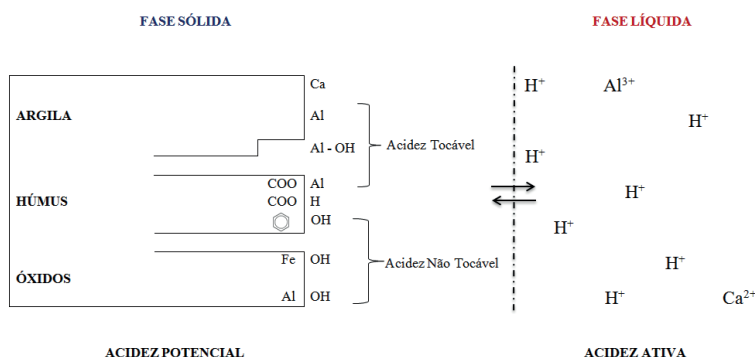
Com a percolação de ânions nitrato (NO_3^-) acontece concomitantemente o arraste de um cátion (Ca^{2+} , K^+ , Mg^+ e Na^+) para manter a solução do solo neutra. Logo, nas camadas superficiais mantêm-se os íons H^+ , acidificando o solo.

- I **Práticas Agrícolas:** O uso de fertilizantes (amoniacoal e ureia) pode causar a redução do pH quando utilizados com elevada frequência e em solos com baixo poder tampão.

Também influencia na acidificação do solo o sistema de manejo. O sistema de plantio direto (SPD) permite o acúmulo de resíduos vegetais na superfície, favorecendo a acidificação do solo. Contudo, nesta condição não ocorre acentuada toxicidade de Al^{3+} devido à complexação pelas substâncias orgânicas formadas no processo de decomposição do material vegetal.

Os solos brasileiros são, em sua maioria, ácidos ($\text{pH} < 5,5$) em razão do alto grau de intemperização e da intensa lixiviação de bases. A acidez é subdividida em ativa ou potencial, e esta, por sua vez, em acidez trocável e acidez não trocável (Figura 2.7).

Figura 2.7- Representação da acidez potencial e acidez ativa do solo.



Fonte: Adaptado de Meurer (2004).

2.4.1.1 Acidez Ativa e Acidez Potencial

A acidez ativa refere-se à concentração de íons H^+ na solução do solo, sendo sua medida expressa pelo valor de pH (Tabela 2.2), e calculada através do logaritmo negativo da concentração molar de H^+ na solução (Equação 1).

$$pH = -\log [H^+]$$

(Equação 1)

Tabela 2.2- Classificação da acidez do solo em função do valor de pH em água.

pH em água	Classificação
< 5,0	Extremamente ácido
5,0 – 5,5	Muito ácido
5,6 – 6,0	Ácido
6,1 – 6,5	Pouco ácido
6,6 – 7,0	Aproximadamente neutro
7,1 – 7,5	Pouco alcalino
7,5 – 8,0	Alcalino
> 8,0	Muito alcalino

Fonte: Meurer (2004).

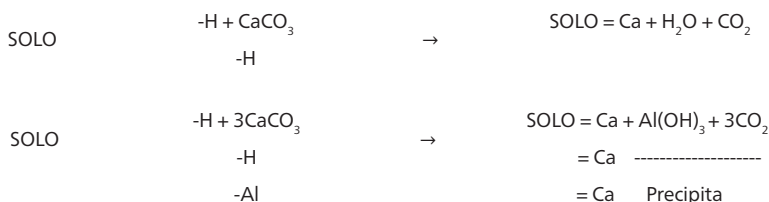
Enquanto a acidez potencial refere-se a todas as fontes de H^+ nos componentes sólidos do solo, representados principalmente pelo alumínio trocável e grupos funcionais. Logo, a acidez potencial é proporcional aos teores de Al^{3+} , argila e MO do solo e é determinada pelo índice SMP (Shoemaker, McLean, Pratt), medida que estima a necessidade de calagem do solo, indicando a quantidade de calcário necessária para corrigir a acidez. Enfatizando que, a correção do solo com utilização de calcário deve ser realizada através dos valores da acidez potencial, a qual é mais prejudicial ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

Na acidez potencial é observada a acidez trocável, a qual compreende a quantidade de Al^{3+} adsorvido pelas cargas negativas do solo, mantendo o equilíbrio com a solução do solo. Enquanto a acidez não trocável refere-se à quantidade de H ligado aos grupos funcionais da MOS e dos óxidos e argila.

2.4.1.2 Correção da Acidez do Solo

A calagem é uma prática agrícola essencial para a correção da acidez do solo, possibilitando condições ideais para o desenvolvimento e crescimento vegetal. Em resumo, a calagem consiste na aplicação de calcário agrícola, o qual é capaz de gerar íons oxidrila e bicarbonato capazes de neutralizar os íons H^+ no solo para elevar o pH e neutralizar a acidez (ERNANI, 2016).

O calcário agrícola é composto principalmente de carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de magnésio (MgCO_3). Quando aplicado ao solo, o calcário reage com a acidez presente, liberando íons de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), neutralizando os íons de hidrogênio (H^+) responsáveis pela acidez.



Em resumo, o carbonato de cálcio ou o carbonato de magnésio reagem com o hidrogênio do solo liberando água e gás carbônico. Enquanto o alumínio é insolubilizado na forma de hidróxido.

Essa reação de neutralização ajuda a elevar o pH do solo, tornando-o menos ácido e mais propício ao desenvolvimento das plantas. Contudo, a quantidade de calcário a ser aplicada depende do tipo de solo, do nível de acidez e das exigências nutricionais das culturas. Logo, recomenda-se realizar uma análise de solo para determinar a necessidade de calagem e calcular a dose adequada.

Em relação à calagem, é importante frisar que, além de corrigir a acidez, ela proporciona vantagens físicas, químicas e biológicas:

- I Efeitos Físicos:** A presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} promove a agregação das partículas do solo, melhorando sua estrutura e permitindo uma melhor aeração e infiltração de água. A calagem também pode reduzir a compactação, facilitando o desenvolvimento das raízes das plantas. Ainda, um solo mais bem estruturado e num grau de compactação menor, resultante da calagem, tende a ser mais resistente à erosão hídrica e eólica.
- I Efeitos Químicos:** O calcário reage com os íons H^+ presentes no solo, elevando o pH e neutralizando a acidez. Durante a reação de neutralização, o calcário libera íons Ca^{2+} e Mg^{2+} , que são importantes nutrientes para as plantas. Também, o aumento do pH promovido pela calagem pode aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, especialmente de P e micronutrientes como Zn e Mn.
- I Efeitos Biológicos:** Um pH adequado do solo devido à calagem pode promover a atividade microbiana benéfica, que auxilia na decomposição da MO e ciclagem de nutrientes. O uso de calagem pode melhorar a fixação simbiótica de N em leguminosas, promovendo um melhor aproveitamento desse nutriente pelas plantas. Também, um pH mais

adequado proporcionado pela calagem pode criar condições mais favoráveis para a atividade de minhocas, insetos benéficos e outros organismos do solo, contribuindo para a saúde e fertilidade do solo.

Por último, enfatiza-se que o efeito residual do calcário é de longa duração, contudo não é permanente uma vez que o processo de acidificação do solo continua mesmo depois que a calagem é realizada. Assim, cada ano devem ser coletadas amostras do solo para determinar o pH; se estiver abaixo dos valores recomendados, deve-se fazer nova aplicação de calcário, sendo que a utilização adequada do calcário permite uma reaplicação não antes de três anos de cultivo.

2.4.2 Salinidade do solo

A salinização refere-se ao aumento na concentração de sais solúveis no solo em razão a drenagem imperfeita. Logo, solos com excessos de sais (halomórficos) constituem-se em um fator limitante para a produção agrícola, devido ao aumento do potencial osmótico na solução do solo e a toxidez resultante da concentração salina e do efeito específico de íons, causando, também, a desestruturação, o aumento da densidade aparente e da retenção de água, a diminuição da infiltração de água e a redução da fertilidade (Carneiro, 2015).

Solos halomórficos ocorrem principalmente em regiões áridas ou semiáridas, nas quais a escassez de precipitação pluvial proporciona o acúmulo dos sais solúveis em resposta à dificuldade de percolação. Ainda, a elevada evapotranspiração e a presença de camadas impermeáveis contribuem para o aumento da salinidade do solo. Também, esse processo depende do material de origem, da qualidade da água de irrigação, da salinização de água marinha, e entre outros.

Os íons mais comuns em solos salinos são os ânions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} e NO_3^- e os cátions Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , os quais formam sais solúveis como nitratos, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos e cloretos.

2.4.2.1 Classificação dos Solos Halomórficos

Os solos halomórficos são formados pelos processos de salinização, solonização e solodificação são classificados com embasamento no conteúdo total de sais solúveis e na porcentagem de sódio trocável (PST) (Equação 2), o qual refere-se ao percentual de Na^+ em relação a CTC.

$$PST = \frac{Na}{CTC} \times 100 \quad (2)$$

Os métodos de estimação rápido e simples da quantidade total de sais solúveis do solo referem-se à determinação do valor de pH e da condutividade elétrica (CE), devido a que maiores concentrações salinas promovem aumento na concentração de íons e maior intensidade na corrente conduzida pela solução, logo a condução da corrente elétrica é diretamente proporcional à quantidade de íons na solução.

A utilização destes parâmetros permite a classificação dos solos halomórficos em solos salinos, sódicos e salinos-sódicos, como apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação dos solos com presença de sais solúveis com relação aos valores de pH, condutividade elétrica (CE) e percentagem de sódio trocável (PST).

Classificação	pH	CE	PST
		dS cm ⁻¹	%
Salino	< 8,5	≥ 4,0	< 15
Sódico	8,5 - 10	< 4,0	≥ 15
Salino-Sódico	≤ 8,5	≥ 4,0	≥ 15

Fonte: Gheyi et al. (2016).

- Solos Salinos: São caracterizados por apresentarem PST < 15%, pH < 8,5 e CE ≥ 4,0 dS m⁻¹. Os solos salinos apresentam elevada concentração de sais solúveis na solução do solo e ausência de quantidades expressivas de Na⁺ no complexo de troca, tornando os solos floculados e com permeabilidade igual ou maior que a de solos similares não salinos.
- Solos Sódicos: Caracterizam-se por apresentar PST ≥ 15%, CE < 4,0 dS m⁻¹ e pH entre 8,5 e 10. Estes solos são resultantes da drenagem natural e/ou artificial de solos salinos-sódicos, resultando na permanência do Na⁺ no complexo de troca, proporcionando alterações químicas e físicas como, por exemplo, dispersão da argila e da MO.
- Solos Salinos-Sódicos: São solos com PST ≥ 15%, CE ≥ 4,0 dS m⁻¹ e pH ≤ 8,5. São solos com características similares aos anteriores, com concentração maior de Na⁺. São solos com alta permeabilidade e estrutura física em razão a predominância de cátions divalentes.

2.4.2.2 Solos Salinos e Sódicos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

Os solos halomórficos não constituem uma classe individualizada no 1º nível categórico, logo, a salinidade e sodicidade separam classes em níveis hierárquicos mais baixos de diversas ordens do sistema, diferenciando-os em **caráter salino** (CE

$\geq 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ e $< 7,0 \text{ dS m}^{-1}$), **caráter salíco** ($\text{CE} \geq 7 \text{ dS m}^{-1}$), **caráter solódico** (PST entre 6% a <15%) e **caráter sódico** (PST $\geq 15\%$) (Lopes; Silva; Guilherme, 1991; Gheyi et al. 2016).

Os altos níveis de salinidade (caráter salino) e sodicidade (caráter sódico) são utilizados para níveis de subordem e grande grupo. São observados nas classes de solos como Cambissolos, Gleissolos, Neossolos Flúvicos, Planossolos e Vertissolos localizados em posições baixas do relevo, como, por exemplo:

- CAMBISSOLO FLÚVICO Sódico ou Sálco
- CAMBISSOLO HÁPLICO Sódico
- GLEISSOLO SÁLICO Órtico
- GLEISSOLO SÁLICO Sódico
- NEOSSOLO FLÚVICO Sódico ou Sálco
- VERTISSOLO HÁPLICO Sódico ou Sálco
- PLANOSSOLO NÁTRICO Sálco

Por sua vez, solos com níveis moderados de sodicidade e salinidade são utilizados para separar classes no quarto nível (subgrupo) de várias classes de solos como, por exemplo:

- CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico solódico
- GLEISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico solódico ou salino
- NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico solódico ou salino
- VERTISSOLO HÁPLICO Órtico salino ou solódico

2.4.2.3 Recuperação de Solos Halomórficos

A salinização dos solos pode ser revertida com a utilização de práticas de manejo apropriadas, considerando a qualidade e a quantidade de água, a permeabilidade do solo, a frequência de irrigação, o preparo do solo, o uso de fertilizante, a cultura, entre outros.

Para a reversão da salinização dos solos, pode ser realizada a percolação de água de boa qualidade, isto é, mínima concentração de eletrólitos. Outro método utilizado, principalmente para solos sódicos e salinos-sódicos, é a aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Neste processo, ao realizar a aplicação de gesso agrícola, acontece o deslocamento do íon Na^+ pelo íon Ca^{2+} , formando o Na_2SO_4 , resultando em sua percolação.

2.5 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

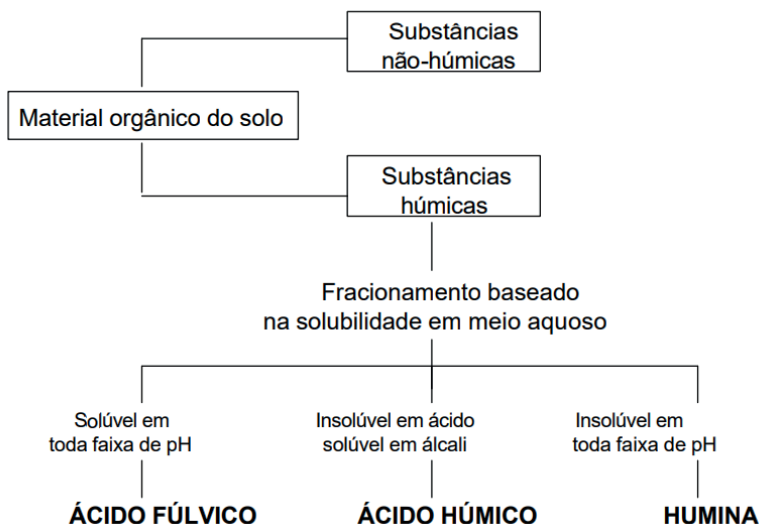
A matéria orgânica do solo (MOS) é um material complexo oriundo da decomposição dos resíduos vegetais e/ou animais, sendo constituído principalmente por carbono (52% a 58%), oxigênio (34% a 39%), hidrogênio (3,3% a 4,8%) e nitrogênio (3,7% a 4,15%) e pequenas quantidades de outros elementos (Carvalho, 2015; Bettiol et al. 2023).

No solo, a fração orgânica subdivide-se em diferentes formas com estabilidade química e efeito nas propriedades do solo bastante diferentes, como apresentado na sequência:

- **Resíduos Orgânicos ou Liteira:** Refere-se à MOS formada por tecidos de plantas e/ou animais não decompostos e/ou decompostos parcialmente, encontrados na superfície do solo. Logo, deve ser excluído da amostragem para análise de fertilidade.
- **Fração Leve:** Representa entre 2% e 30% da MOS. A fração é composta de resíduos em diversos estágios de decomposição. A sua composição química é semelhante à liteira por apresentar semelhança com o material de origem.
- **Biomassa Microbiana:** Corresponde entre 2% e 5% da MOS. Consiste na biomassa microbiana e participa da decomposição dos resíduos adicionados ao solo. Possui potencial para liberar nutrientes às plantas pelo processo de mineralização de resíduos. Assim como, pode causar a imobilização temporária dos nutrientes, principalmente do nitrogênio.
- **Substâncias não-húmicas:** No solo, compreende um total de 5% a 25%, entretanto, persistem por pequeno período devido à ação dos microrganismos. Apresentam estrutura química conhecida e são constantemente produzidos pelo ciclo dos organismos vivos no solo. Referem-se aos carboidratos (glicose, galactose, celulose, hemicelulose e lignina), aminoácidos (glicina e lisina), ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ácido acético, ácido fórmico e ácido cítrico), gorduras e resinas.
- **Substâncias húmicas:** Representam quase a totalidade de MOS. Refere-se a compostos orgânicos com elevado peso molecular, alta reatividade e coloração escura, resintetizados a partir do processo de humificação, formando o húmus. Sua estrutura química não é definida em razão a alta complexidade estrutural e química, dificultando a ação dos microrganismos, tornando o processo de decomposição lento e permitindo o acúmulo como MOS. Ainda, o húmus pode estar relacionado aos fenômenos de adsorção e precipitação com compostos inorgânicos, além de processos bioquímicos.

Também o húmus pode ser diferenciado em diferentes frações (humina, ácido húmico e ácido fúlvico) com embasamento em características da sua solubilidade em meio ácido e alcalino (fracionamento químico). como apresentado na Figura 2.8

Figura 2.8- Representação do fracionamento químico da matéria orgânica do solo.



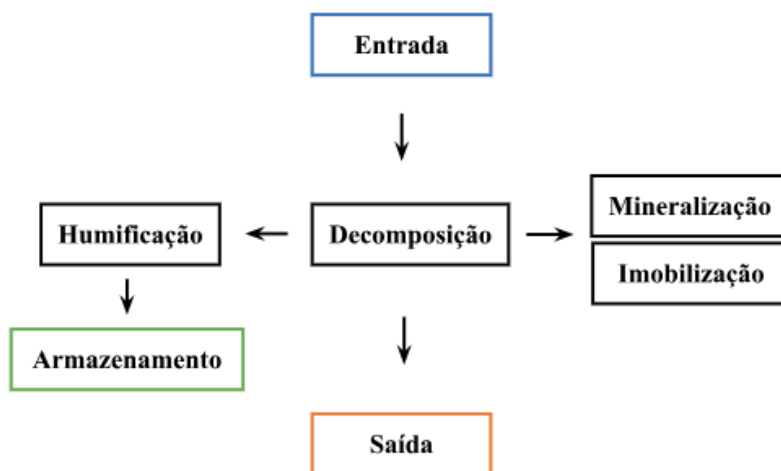
Fonte: Rosa (1998)

A humina é uma fração insolúvel em meio alcalino, mantendo-se junto à fração mineral. Por sua vez, o ácido húmico e o ácido fúlvico são extraídos do solo em meio alcalino. Contudo, com a acidificação do meio o ácido húmico é removido, enquanto o ácido fúlvico mantém-se na solução.

2.5.1 Dinâmica da matéria orgânica no solo

A dinâmica da MOS (Figura 2.9) compreende desde a incorporação dos resíduos e estende-se até a formação das frações humificadas mais estáveis (huminas) (Costa, 2013; Carvalho, 2015).

Figura 2.9- Dinâmica da matéria orgânica no solo.



A **entrada** da MOS acontece através de resíduos vegetais e resíduos animais, os quais são fonte de C para formação do húmus e de nutrientes essenciais para os microrganismos do solo. Na sequência ocorre o processo de **decomposição** dos resíduos orgânicos por meio dos microrganismos do solo, formando compostos mais simples através de processos bioquímicos e liberando nutrientes para N, P, S e entre outros minerais no solo.

Durante a decomposição, acontece a **humificação**, em que parte dos resíduos orgânicos é transformada em húmus. Também, durante a decomposição da MO, os nutrientes contidos nos resíduos orgânicos são **mineralizados** e transformados em formas disponíveis para as plantas. No entanto, parte desses nutrientes pode ser **imobilizada** por microrganismos do solo para seu próprio crescimento e metabolismo, reduzindo temporariamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

A **saída** a MOS ocorre principalmente por meio da erosão do solo, lixiviação de compostos solúveis, volatilização de compostos gasosos e decomposição adicional de resíduos orgânicos por microrganismos do solo. A perda de matéria orgânica do solo pode ser acelerada por práticas agrícolas inadequadas, como o revolvimento excessivo do solo e a remoção de culturas de cobertura.

Por último, parte da matéria orgânica decomposta e humificada é **armazenada** no solo por longos períodos, contribuindo para a formação de horizontes orgânicos em solos desenvolvidos e aumentando a fertilidade do solo em longo prazo. O armazenamento de matéria orgânica no solo é influenciado por fatores como teor de argila, pH, drenagem e práticas de manejo do solo.

2.5.2 Funções da matéria orgânica do solo

O teor de MOS nos horizontes minerais varia entre 0,5 e 5% concentrando-se nas camadas superficiais, enquanto em solos orgânicos os valores são maiores. A presença de MOS proporciona efeitos nas propriedades biológicas, químicas e físicas do solo e no crescimento e desenvolvimento vegetal (Costa, 2013; Ernani, 2016).

- **Efeitos Químicos:** A MOS é uma fonte importante de nutrientes (N, P, S, K e entre outros) para as plantas quando mineralizada pelos microrganismos. Também contribui significativamente para a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, como, por exemplo, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} , favorecendo a retenção de nutrientes e elevando a fertilidade do solo.

Ainda, a presença de grupos funcionais ácidos e básicos na MOS, influencia na regulação do pH do solo. Logo, a MOS pode atuar como um tampão e resistir a alterações intensas no pH do solo, mantendo o ambiente adequado para o crescimento das plantas.

Por último, a MOS pode formar complexos com metais pesados no solo, reduzindo sua disponibilidade e minimizando os efeitos tóxicos destes metais.

- **Efeitos Físicos:** A presença de MOS promove a união das partículas do solo e agregados maiores, favorecendo a estabilidade do solo e melhorando a estrutura do solo e a capacidade de retenção de nutrientes e água. Também, contribui para a formação de espaço poroso no solo, estes que, além de habitat para os organismos do solo, são essenciais para a circulação de água, ar e nutrientes. Ainda, a cobertura do solo com resíduos orgânicos minimiza as variações de temperatura e umidade nas camadas superficiais durante o dia, e reduz o impacto das gotas da chuva no processo de desagregação das partículas. E solos com teores adequados de MOS são menos suscetíveis à compactação, pois a MOS mantém a estrutura do solo, tornando-o mais resistente à compactação causada por pisoteio animal e tráfego de máquinas agrícolas e/ou florestais.
- **Efeitos Biológicos:** A MOS apresenta efeito fundamental e direto na atividade e diversidade da biota do solo através do fornecimento gradual de nutrientes (C, N, P, S e entre outros) para os microrganismos do solo. Ainda, alguns compostos orgânicos na MOS apresentam propriedades bioativas que influenciam a atividade e sobrevivência de pragas e patógenos no solo, sendo que microrganismos benéficos na MOS contribuem para o controle biológico de pragas e doenças ao competirem por recursos com patógenos. Logo, a presença de MOS favorece um ambiente viável para a biodiversidade microbiana, vegetal e animal.

TESTE SEU CONHECIMENTO ☺

01) A fase líquida do solo, também conhecida como solução do solo, é composta principalmente por:

- a) Fragmentos de rochas e matéria orgânica.
- b) Ar atmosférico e gases provenientes da respiração das raízes.
- c) Água, minerais dissolvidos e compostos orgânicos.
- d) Somente água da precipitação.

02) Analise as afirmações a seguir e marque (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

- () A fase sólida do solo constituindo aproximadamente 50% do volume do solo e é composta exclusivamente por matéria mineral.
 - () A fase líquida do solo é denominada solução do solo e contém água, minerais dissolvidos e compostos orgânicos.
 - () Os gases presentes na fase gasosa do solo são iguais aos encontrados na atmosfera, sem variação nas concentrações de O_2 e CO_2 .
 - () A matéria orgânica do solo concentra-se principalmente nas camadas profundas do solo e depende de fatores como clima, vegetação e uso do solo.
- a) V, V, F, V.
 - b) F, V, F, F.
 - c) F, V, V, F.
 - d) F, F, V, V.

03) Complete as sentenças a seguir:

- a) Os minerais do tipo 2:1 são caracterizados pela presença de uma folha _____ entre duas folhas _____.
- b) A estrutura da caulinita é formada por uma lâmina de _____ de Si e uma lâmina de _____ de Al.
- c) A _____ é um óxido de ferro que confere coloração avermelhada ao solo e apresenta forma _____.

04) Analise as afirmações abaixo e indique se são verdadeiras (V) ou falsas (F).

- a) () Os minerais secundários são formados exclusivamente a partir de processos de intemperismo de minerais primários.

- b) () Os filossilicatos do tipo 2:1, como esmectitas e vermiculitas, apresentam baixa capacidade de troca de cátions.
- c) () A caulinita é um mineral do tipo 2:1 encontrado em climas temperados, solos altamente intemperizados e possui baixa capacidade de expansão.
- d) () A hematita, Gibbsita e a goethita são exemplos de óxidos de ferro formados em solos com baixo teor de matéria orgânica.

05) Relacione os minerais aos seus principais atributos:

1. **Vermiculita**
2. **Caulinita**
3. **Hematita**
4. **Goethita**

- () Mineral com baixa capacidade de troca de cátions e pouca expansão.
- () Óxido de ferro, confere coloração avermelhada ao solo.
- () Estrutura expansível, usada em substratos agrícolas.
- () Óxido de ferro hidratado, coloração amarelada.

06) Entre os efeitos físicos da matéria orgânica do solo (MOS), destaca-se:

- a) Melhoria na estrutura do solo e aumento da capacidade de retenção de água.
- b) Diminuição da atividade microbiana e da diversidade biológica.
- c) Aumento da lixiviação de nutrientes e da erosão do solo.
- d) Acidificação intensa do solo, prejudicando o crescimento das plantas.

07) Indique se as afirmações abaixo são verdadeiras (V) ou falsas (F):

- () A fração argila do solo, devido à sua natureza coloidal, apresenta alta capacidade de troca iônica e desempenha um papel essencial nos processos químicos do solo.
- () As cargas elétricas permanentes nas argilas do tipo 2:1 são resultado de substituições isomórficas que ocorrem nas lâminas octaédricas e tetraédricas.
- () A adsorção específica de cátions no solo envolve principalmente íons como Ca^{2+} , K^+ e Na^+ , devido à sua forte ligação química com os coloides.

08) Assinale a afirmativa correta:

- a) A área superficial específica (ASE) é uma medida que relaciona a granulometria de um sólido e sua massa, influenciando diretamente as interações entre a fase sólida e as fases líquida e gasosa.
- b) Os ânions como fosfato e sulfato tendem a ser adsorvidos de forma específica, formando ligações químicas de alta energia com os colóides, especialmente em solos ricos em caulinita e óxidos de ferro.
- c) As cargas elétricas dependentes do pH são comuns nas bordas dos argilominerais e na superfície de óxidos e matéria orgânica, sendo influenciadas pelo pH do solo.

09) A acidez potencial do solo é composta por:

- a) Íons H^+ dissolvidos na solução do solo.
- b) Al^{3+} trocável e grupos funcionais de argila e matéria orgânica.
- c) Apenas íons de cálcio e magnésio.
- d) Elementos solúveis e íons Na^+ .

10) Entre os efeitos físicos da matéria orgânica do solo (MOS), destaca-se:

- a) Melhoria na estrutura do solo e aumento da capacidade de retenção de água.
- b) Diminuição da atividade microbiana e da diversidade biológica.
- c) Aumento da lixiviação de nutrientes e da erosão do solo.
- d) Acidificação intensa do solo, prejudicando o crescimento das plantas.

11) Explique como o uso de fertilizantes amoniacais pode influenciar na acidez do solo e descreva como a prática da calagem pode corrigir essa acidez.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília: EMBRAPA, 2023. 788 p.

CARNEIRO, M. A. **Salinidade do solo, produtividade e qualidade de frutos de mangueira fertirrigada com fontes e doses de potássio**. 2015. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2015.

CARVALHO, C. S. **Matéria orgânica, agregação e proteção física em solos tratados com lodo de esgoto**. 2015. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agronômico, Campinas, 2015.

CESSA, R. M. A.; CELI, L.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; BARBERIS, E. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 1153-1162, 2009.

COSTA, E. M.; SILVA, H. F.; RIBEIRO, P. R. A. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1842-1861, 2013.

CRESSER, M.; KILLHAM, K.; EDWARDS, T. **Soil chemistry and its applications**. Cambridge University Press, 1993.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. 2. ed. Lages: O Autor, 2016. 256 p.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da Salinidade na Agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza: Inctsal, 2016. 530 p.

LOPES, A. S.; SILVA, M. C.; GUILHERME, L. R. G. **Acidez do solo e calagem**. São Paulo: Anda, 1991. 17 p.

LOPES, A. S. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. São Paulo: ANDA, 2017. 245 p.

RODRIGUES, R. A. S. **Ciência do Solo: morfologia e gênese**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2018. 264 p.

ROSA, A. H. **Desenvolvimento de metodologia para extração de substâncias húmicas de turfa utilizando-se hidróxido de potássio**. Instituto de Química da UNESP, Araraquara, 1998.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. revista e ampliada. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013, 100 p.

SILVA, E. A. **Abordando o solo na escola: para professores do ensino fundamental e médio**. Curitiba: UFPR, 2020. 22 p.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba: Edição dos Autores, 2011. 53 p.



C A P Í T U L O 3

MORFOLOGIA E FÍSICA DO SOLO

Elias da Silva Scopel

Adriana Modolon Duarte

3.1 PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS E DESCRIÇÃO DE PERFIS DE SOLO

Para a física, o solo é um meio poroso, não rígido, trifásico, constituído pelas fases ar, água e solo, formado de partículas que apresentam complexidade de forma, tamanho e estrutura.

As propriedades morfológicas do solo referem-se às características físicas e visíveis que podem ser observadas a olho nu ou com instrumentos simples. Essas propriedades são essenciais na classificação e descrição dos solos, já que fornecem informações sobre a formação e o desenvolvimento do perfil de solo ao longo do tempo. Um perfil de solo descrito corretamente, permite avaliar o histórico de processos ambientais e a capacidade do solo em sustentar diferentes tipos de vegetação ou cultivos.

3.2 PERFIL DE SOLO

O perfil de solo é uma representação vertical das camadas ou horizontes, desde a superfície até a rocha matriz ou material não alterado. Essa estrutura proporciona uma visão detalhada das variações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo em diferentes profundidades.

Cada horizonte do perfil de solo reflete condições ambientais e processos pedogenéticos específicos que contribuem para a fertilidade e uso do solo. Conhecer as características dos horizontes do solo e realizar uma análise do perfil, nos permite prever o potencial de uso desse solo, bem como as práticas de manejo mais adequadas.

3.2.1 Horizontes do solo

Os horizontes do solo são camadas que refletem processos como decomposição, lixiviação e acumulação de minerais. Os principais horizontes são identificados por letras maiúsculas e possuem propriedades distintas:

- **Horizonte O ou H (Orgânico):** Composto principalmente por matéria orgânica em decomposição, este horizonte é essencial para a ciclagem de nutrientes e para a proteção do solo contra erosão. Em ecossistemas florestais, o horizonte O pode ser espesso, enquanto em solos agrícolas ele tende a ser menor devido ao manejo intensivo (Harpstead et al. 1996).
- **Horizonte A (Superficial):** Esta camada rica em matéria orgânica e minerais lixiviados abriga a maioria das raízes das plantas e é fundamental para a fertilidade do solo (Lima; Melo, 2007).
- **Horizonte E:** Encontrado em alguns solos, este horizonte é caracterizado pela perda de argila, ferro e alumínio, deixando predominantemente minerais de quartzo, o que confere a ele uma cor clara.
- **Horizonte B (Acumulação):** É onde ocorre a acumulação de argila e minerais transportados dos horizontes superiores. A presença de óxidos de ferro e outros compostos minerais dá ao horizonte B uma coloração característica e maior densidade (Pereira et al. 2019).
- **Horizonte C (Material Não Alterado):** Este horizonte é composto por material rochoso pouco intemperizado, que ainda não foi completamente alterado pelo processo pedogenético.
- **Horizonte R (Rocha Subjacente):** Não é tecnicamente parte do solo, mas é a rocha matriz que contribui para a formação dos horizontes superiores ao longo do tempo (Hillel, 1998).

Figura 3.1- Exemplo de perfil do solo com seus diferentes horizontes.



Fonte: Guitarrara (2023).

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

As propriedades físicas do solo determinam a forma como ele reage a diferentes condições ambientais e práticas de manejo. Entre essas propriedades estão a cor, a consistência, a textura, a estrutura e a porosidade.

3.3.1 Cor do solo

A coloração do solo é uma propriedade morfológica crucial que pode ser prontamente avaliada no terreno. Essa coloração, em sua maioria, nos solos tropicais, reflete principalmente a composição de minerais de ferro e o teor de matéria orgânica presente no solo. A tonalidade de um horizonte ou camada pode mostrar uma uniformidade relativa ou apresentar combinações de várias tonalidades. A identificação da coloração do solo no campo é uma tarefa simples que envolve a comparação visual de amostras secas e úmidas, fazendo uso do sistema de carta de cores de Munsell.

Os pigmentos naturais, principalmente os óxidos de ferro e a matéria orgânica, encontrados no solo, desempenham um papel crucial na determinação de sua coloração. Em solos arenosos, a presença limitada de ferro e matéria orgânica resulta em colorações claras, devido à predominância dos grãos de quartzo. Em contrapartida, solos argilosos possuem maior concentração de óxidos de ferro e matéria orgânica, o que os torna mais coloridos. A quantidade de matéria orgânica afeta diretamente a intensidade da coloração do solo, sendo que maiores quantidades conferem uma tonalidade mais escura.

A forma dos óxidos de ferro é o fator determinante da cor do solo, o que significa que solos com teores elevados ou reduzidos de ferro podem exibir cores variadas, como amarelo, vermelho ou marrom, as quais imprimem certas características ao solo, de acordo com Pereira et al. (2019):

- Tonalidades claras (Cinza, Bege): geralmente sinalizam baixa presença de matéria orgânica e baixa concentração de óxidos de ferro. Esses tipos de solos podem ser deficientes em nutrientes e podem possuir uma capacidade reduzida para reter água. A falta de matéria orgânica pode prejudicar a fertilidade do solo.
- Tonalidades vermelhas e amarelas: a existência de óxidos de ferro pode conferir matizes vermelhos, amarelos ou alaranjados ao solo. A intensidade da tonalidade pode variar de acordo com a estrutura dos óxidos de ferro presentes. Solos com tons vermelhos podem denotar a presença de ferro na forma de hematita, enquanto solos com matizes amarelos podem indicar a presença de goethita. Essas tonalidades podem sugerir adequadas condições de drenagem e aeração, mas não necessariamente espelham a fertilidade do solo.
- Tonalidades escuras (preto, marrom-escuro): tons escuros normalmente indicam uma quantidade significativa de matéria orgânica em decomposição. Esta matéria orgânica enriquece a fertilidade do solo ao fornecer nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. Além disso, solos de tons mais escuros geralmente têm uma capacidade superior de retenção de água em comparação com solos mais claros.
- Tonalidades azul ou cinza em solos encharcados: essas cores, especialmente quando estão saturados de água, podem sinalizar questões de drenagem ou retenção excessiva de água. Essas circunstâncias podem resultar na escassez de oxigênio nas raízes das plantas, prejudicando o desenvolvimento das culturas.

3.3.2 Consistência do solo

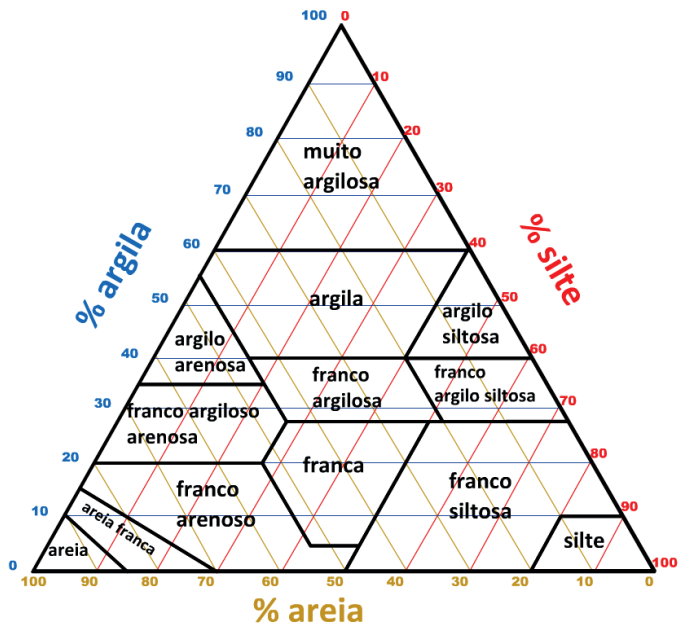
A consistência do solo é uma característica morfológica que pode ser percebida pelo tato e se manifesta através da sua dureza, friabilidade, pegajosidade e plasticidade do solo. Quando o solo está seco, a consistência se traduz em dureza, que representa a sua resistência à quebra; para avaliá-la devemos pegar um pedaço de solo seco e tentar quebrá-lo com os dedos ou, se necessário, com as mãos. Em casos de solos extremamente firmes, até mesmo o uso de ambas as mãos pode não ser suficiente para quebrá-los (Lima; Melo, 2007).

Quando o solo está úmido, tratamos a consistência como friabilidade, esta é uma característica que se refere à capacidade do solo de se desfazer facilmente em pequenos pedaços ou torrões quando é manipulado ou trabalhado. Em solos friáveis, a estrutura do solo é solta e granular, o que facilita a aeração, a penetração de raízes das plantas e o preparo do solo para o cultivo. A plasticidade também é vista em solos úmidos, onde este pode ser moldado em diferentes formas. Já a pegajosidade, é uma característica de solos molhados, e refere-se à aderência do solo às mãos ou a outros objetos.

3.3.3 Textura e granulometria do solo

A textura do solo é definida pela proporção de partículas primárias (areia, silte e argila) que o compõem (Figura 3.2). Ela afeta diretamente a retenção de água, a aeração e a disponibilidade de nutrientes. Solos arenosos, com grandes poros, drenam rapidamente, enquanto solos argilosos retêm água por mais tempo devido aos poros menores.

Figura 3.2 – Triângulo textural do solo.



Fonte: Quoos (2016).

A textura do solo é um dos principais indicadores de qualidade e produtividade dos solos, pois afeta a adesão e coesão entre as partículas do solo devido aos seus diferentes diâmetros (Tabela 3.1), bem como o manejo dos solos (He et al. 2014). Isso, por sua vez, impacta a dinâmica da água no solo. Além disso, a textura do solo desempenha um papel como um fator ambiental, influenciando diretamente os processos ecológicos, como a ciclagem de nutrientes e a troca de íons.

Tabela 3.1 – Escalas granulométricas.

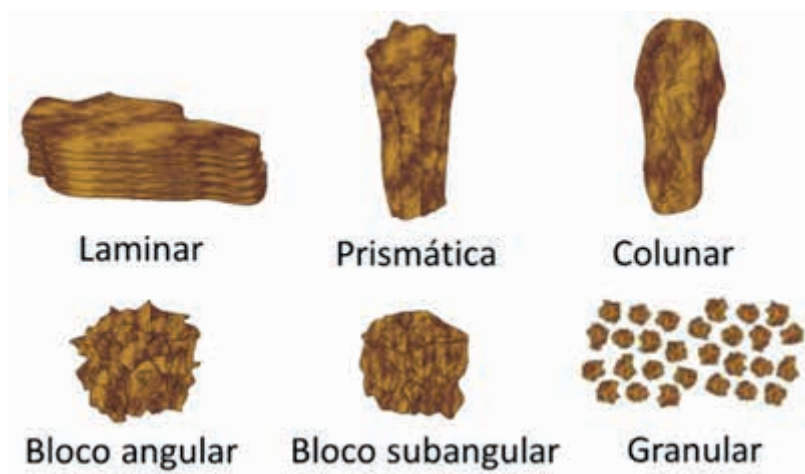
Fração	Diâmetro (mm)
Areia grossa	2,0 – 0,2
Areia fina	0,2 – 0,053
Silte	0,053 – 0,002
Argila	<0,002

Fonte: EMBRAPA, 2017.

3.3.4 Estrutura do solo

Lima e Melo (2007) definem que os agregados do solo, comumente conhecidos como “torrões do solo”, na sua configuração natural, constituem a organização estrutural do solo. Esses agregados se caracterizam por apresentar uma diversidade de tamanhos e formas (Figura 3.3), mas essencialmente consistem na união das partículas elementares, ou seja, grãos de areia, silte e argila.

Figura 3.3 - Representação esquemático das estruturas do solo.



Fonte: Adaptado de Capeche (2008).

3.3.5 Porosidade do solo

Os poros no solo são retratados como cavidades de variados tamanhos e formatos, os quais são determinados pela organização das partículas sólidas e compreendem a fração volumétrica do solo que é preenchida com ar, água e nutrientes. Dessa forma, os poros são o local onde acontecem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo (Hillel, 1972; Cooper, 2019).

Hillel (1980) constatou que um solo considerado ideal deve exibir um tamanho e capacidade apropriados de porosidades, para permitir a entrada, circulação e retenção de água e ar, de modo a atender às exigências das plantações, sendo categorizados conforme suas dimensões e funções em: criptoporos ($<0,2 \mu\text{m}$), microporos ($0,2 - 50 \mu\text{m}$), macroporos ($50 \mu\text{m}$).

3.3.6 Capacidade de retenção de água

A capacidade de retenção de água (CRA) é um parâmetro crucial na agricultura, na gestão de recursos hídricos e na compreensão dos ecossistemas terrestres. Ela se refere à habilidade de um solo em reter água após a drenagem excessiva, permitindo que as plantas acessem a água de que precisam ao longo do tempo. A capacidade de retenção de água no solo é influenciada por vários fatores, incluindo a textura do solo, a estrutura, a matéria orgânica e as condições climáticas (Portela, 2001). Brady e Weil (2008) conceituam outros parâmetros interligados a CRA, sendo eles:

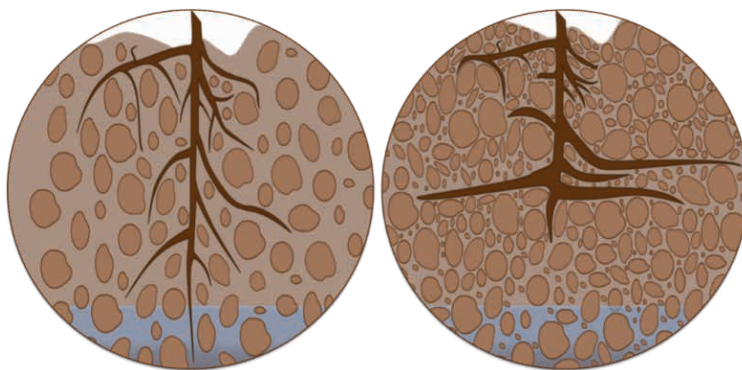
- I Capacidade de campo (CC): descrita como a capacidade de um solo reter água disponível para as plantas, referindo-se à quantidade máxima de água que um solo é capaz de reter após a drenagem gravitacional do excesso de água.
- I Ponto de murcha permanente (PMP): se refere ao teor de umidade do solo no qual as plantas não conseguem mais extrair água devido à força de sucção excessiva no solo. Em um solo bem drenado, as plantas podem extrair água até que o solo atinja esse ponto de murcha permanente, após o qual elas começam a murchar e podem eventualmente morrer devido à falta de água.

3.3.7 Densidade do solo

De acordo com Almeida et al. (2017) a densidade do solo é uma medida que descreve a massa de um solo por unidade de volume, é um parâmetro importante na caracterização do solo, pois está relacionado à compactação e à porosidade do solo, o que, por sua vez, afeta sua capacidade de retenção de água, aeração e fertilidade. Além disso, altos valores de densidade de solo, causam restrição no desenvolvimento de plantas (Scopel, 2023).

A compactação do solo (diminuição da densidade do solo) é o fenômeno que descreve a redução de volume de solos não saturados quando uma pressão externa específica é exercida, essa pressão pode ser originada devido à circulação de máquinas agrícolas, veículos de transporte ou a presença de animais; altos valores de compactação do solo geram dificuldade não crescimento de raízes das plantas, devido ao aumento da resistência a penetração, diminuição dos espaços aéreos dos solos e também interferindo na disponibilidade de água às plantas (Hillel, 1998), como pode ser observado na figura 3.4, onde é ilustrado o crescimento da raiz em solo bem manejado (esquerda) e o mesma raiz em um solo compactado com diminuições dos espaços porosos (direita).

Figura 3.4 – Ilustração de como deve ser o espaço poroso do solo (esquerda) e como é um solo em estado compactado (direita), comparando diferenças no crescimento radicular.



Fonte: Amaral (2021).

3.3.8 Temperatura do solo

De acordo com Dantas et al. (2017), a temperatura do solo emerge como um elemento significativo no crescimento das plantas, uma vez que o solo, além de atuar como reservatório e possibilitar a movimentação de solutos, gases e água, também tem a habilidade de reter e conduzir calor.

A transferência de calor no solo reflete a energia disponível para os processos físicos e biológicos que ocorrem nas camadas mais profundas do solo. Esse fluxo térmico é diretamente influenciado pela variação de temperatura em diferentes profundidades e pela capacidade de condução térmica do solo. Em estudos que envolvem o equilíbrio de energia, a avaliação do calor no solo é de vital importância, uma vez que ele representa a entrada ou saída de energia de um sistema específico, afetando os fluxos de calor latente e sensível e, por conseguinte, influenciando as taxas de evaporação e transpiração (Galvani et al. 2001).

A temperatura do solo, de acordo com Reichardt e Timm (2016) é dependente de três fatores: fatores atmosféricos, podendo destacar a radiação solar, nebulosidade, hora do dia e estações do ano; fatores de cobertura do solo, que podem ser de vários tipos, como vegetado, não vegetado, estufas (plástico, vidro ou telas), ou coberturas mortas; e fatores do solo como suas propriedades físicas (textura, cor, densidade, umidade e condutividade térmica).

3.4 ÁGUA DO SOLO: CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO

A água do solo desempenha um papel crucial na sustentação da vida vegetal e na hidrologia terrestre. Suas características e comportamento são fundamentais para entender os processos ambientais. Reichardt (1990, p. 1) explana que:

“Qualquer cultura, durante seu ciclo de desenvolvimento, consome um enorme volume de água, sendo que cerca de 98% deste volume apenas passa pela planta, perdendo-se posteriormente na atmosfera pelo processo de transpiração. Este fluxo de água é, porém, necessário para o desenvolvimento vegetal e por este motivo sua taxa deve ser mantida dentro dos limites ótimos para cada cultura.”

A retenção de água no solo refere-se à capacidade do solo de manter a água disponível para as plantas e outros processos ambientais. Essa capacidade de retenção de água é influenciada por várias características do solo, incluindo sua textura, estrutura, matéria orgânica e porosidade.

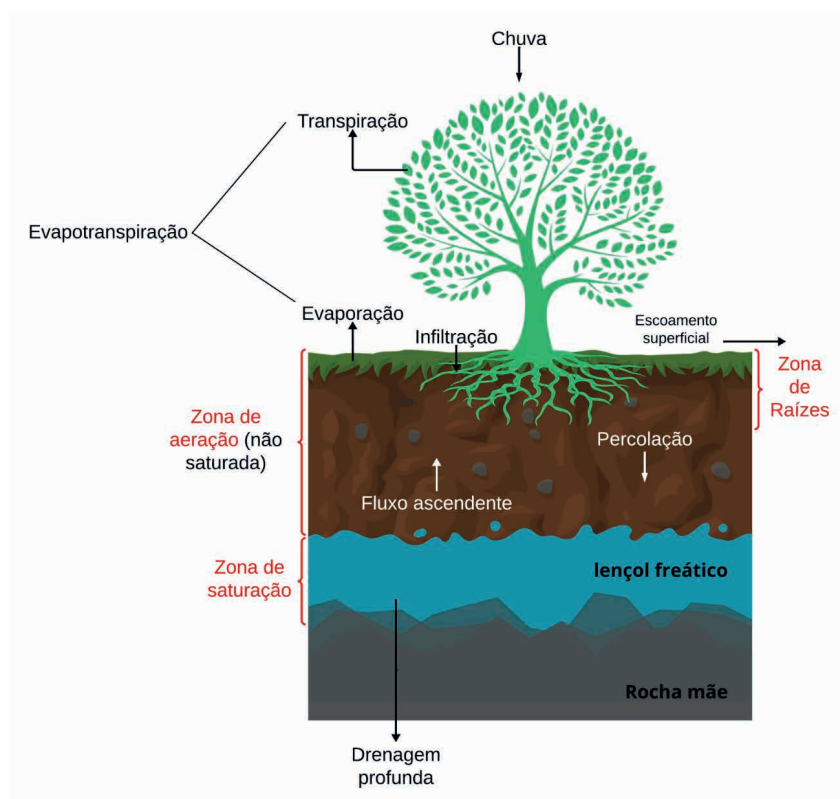
De acordo com Libardi (2005), são dois mecanismos que descrevem como a água é retida em um solo não saturado. No primeiro deles, a retenção acontece nos poros capilares do solo e pode ser exemplificada pelo fenômeno da capilaridade, o qual está sempre ligado a uma interface curva água/ar. No segundo processo, a retenção se dá por meio de camadas finas de água aderidas às superfícies dos sólidos do solo, através do fenômeno de adsorção.

Infiltração é o processo pelo qual a água entra e se mantém no solo enquanto houver disponibilidade de água em sua superfície, é responsável pelo processo de erosão, além de também ser responsável pelo balanço hídrico na área radicular (Reichardt; Timm, 2016).

Quando a chuva ou irrigação é cessada, a água continua a se mover pelo solo, procurando locais com menores potenciais, processo conhecido como **redistribuição**; durante os processos de infiltração e redistribuição, a água pode ser absorvida pelas plantas e ser perdida para a atmosfera (devido ao potencial da atmosfera ser menor do que o da planta), esse processo é chamado de **transpiração**, da mesma forma, o solo pode perder água para a atmosfera em um mecanismo conhecido por **evaporação**.

A união das perdas de água para a atmosfera, da planta e do solo, é denominada de **evapotranspiração**; por fim, quando há perdas de água, onde estas saem da zona explorada pelas raízes, ocorre a **drenagem profunda** (Reichardt, 1978). Um exemplo destes mecanismos pode ser observado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Processos da água na interface solo/planta.



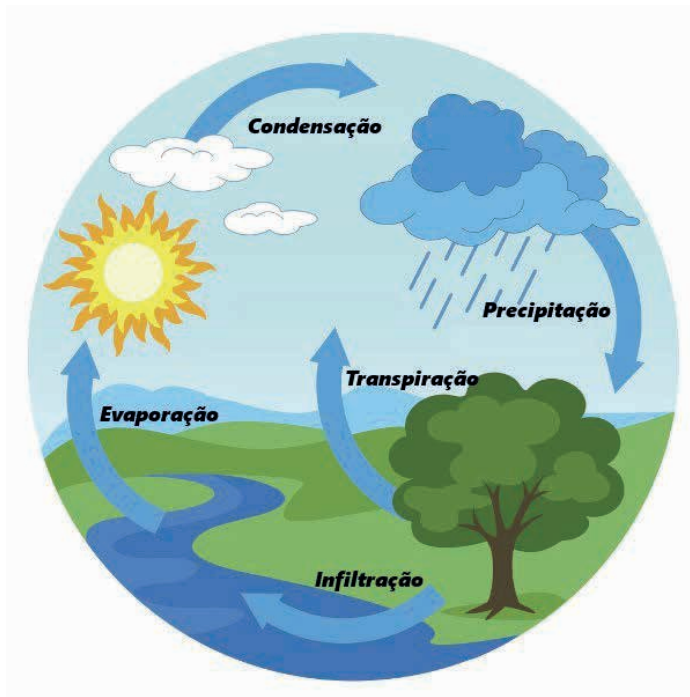
Fonte: Scopel, 2023.

3.5 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico, também conhecido como ciclo da água, é um processo natural que descreve a circulação da água na Terra, incluindo sua evaporação da superfície da Terra, condensação na atmosfera, precipitação de volta à superfície e a subsequente coleta em rios, lagos e oceanos.

Este conceito (Figura 3.6) está associado ao movimento e à troca de água em seus diferentes estados físicos, que ocorrem na Hidrosfera, entre os oceanos, as calotas de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. Esse movimento contínuo é impulsionado pelo Sol, que fornece a energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação), e pela gravidade, que faz com que a água condensada caia de volta à superfície (precipitação) (Carvalho; Silva, 2006).

Figura 3.6 – Ciclo da água na natureza.



Fonte: Santos (2023).

TESTE SEU CONHECIMENTO ©

- 1) Qual das opções a seguir é considerada uma característica morfológica do solo?
 - a) pH do solo
 - b) Capacidade de troca catiônica
 - c) Cor do solo
 - d) Teor de matéria orgânica

- 2) O que é o horizonte O do solo?
 - a) Camada rica em minerais lixiviados
 - b) Horizonte orgânico composto por material em decomposição
 - c) Camada de acumulação de argila
 - d) Horizonte de rocha matriz

- 3) Qual dos seguintes elementos confere coloração vermelha aos solos?
- a) Quartzo
 - b) Matéria orgânica
 - c) Hematita
 - d) Goethita
- 4) A cor amarela no solo geralmente está associada à presença de qual mineral?
- a) Hematita
 - b) Goethita
 - c) Magnetita
 - d) Carbonato de cálcio
- 5) O que indica uma coloração escura no solo?
- a) Alta quantidade de argila
 - b) Presença significativa de matéria orgânica
 - c) Baixa fertilidade
 - d) Elevado teor de quartzo
- 6) Em qual horizonte do solo é comum encontrar a maior parte das raízes das plantas?
- a) Horizonte A
 - b) Horizonte B
 - c) Horizonte C
 - d) Horizonte R
- 7) O que representa a capacidade de campo de um solo?
- a) A quantidade de nutrientes que o solo pode fornecer às plantas.
 - b) A quantidade de água que o solo pode reter após a drenagem.
 - c) A resistência do solo à erosão.
 - d) A capacidade do solo de suportar peso sem compactação.

8) Qual é a camada que contém fragmentos de rocha e material não intemperizado?

- a) Horizonte O
- b) Horizonte A
- c) Horizonte B
- d) Horizonte C

9) Qual é a importância do perfil de solo para a agricultura e estudos ambientais?

- a) Ajuda a determinar a profundidade da rocha matriz.
- b) Permite a descrição e classificação das propriedades químicas e biológicas do solo em diferentes profundidades.
- c) Identifica apenas a coloração superficial do solo.
- d) Serve para determinar a quantidade de matéria orgânica na rocha matriz.

10) Considerando um solo com alto teor de argila e presença de óxidos de ferro, qual das afirmações abaixo é correta sobre a retenção de água e aeração?

- a) Solos com alto teor de argila têm alta retenção de água, mas baixa aeração.
- b) Solos argilosos apresentam baixa retenção de água e alta aeração.
- c) A presença de óxidos de ferro reduz a capacidade de retenção de água em solos argilosos.
- d) Solos com alto teor de argila e óxidos de ferro têm alta aeração, mas baixa capacidade de retenção de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. A.; ALBUQUERQUE, J. A. Ciência do solo. Lages: Udesc, 2007.

AMARAL, G. **Compactação do solo em lavouras cafeeiras:** causas e efeitos no desenvolvimento das plantas. Causas e efeitos no desenvolvimento das plantas. 2021. Disponível em: <https://icl-growingsolutions.com/pt-br/agriculture/knowledge-hub/soil-compaction-coffee-plantations/>. Acesso em: 14 out. 2023.

BRADY, N. C.; WEIL, R. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2016. 1104 p.

CARVALHO, D. F. de.; SILVA, L. D. B. Hidrologia. Seropédica: UFRRJ, 2006.

CAPECHE, C. L. Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. 6. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 51). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPS-2009-09/14002/1/comtec51_2008_nocoos_estrutura_solo.pdf Acesso em: 20 de jan. 2024.

CENTENO, L. N. *et al.* Textura do Solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, Pelotas, v. 4, n. 1, p. 31-37, 30 out. 2017.

COOPER, M. **Porosidade Do Solo**. Piracicaba, 2019. Color. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/793754/mod_resource/content/1/Aula%203%20Estrutura%20e%20Agrega%C3%A7%C3%A3o%20do%20Solo.pdf. Acesso em: 9 ago. 2021.

DANTAS, D. *et al.* Temperatura do ar e do solo em diferentes profundidades, em Diamantina - MG. **Caderno de Ciências Agrárias**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 61-66, dez. 2017.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, v. 60, p. 139-147, 2001.

GUIARRARA, P. "Solo"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/o-solo.htm>. Acesso em 07 de outubro de 2023.

HARPSTEAD, M. *et al.* **Soil Science Simplified**. Ames: The Iowa State University Press, 1997. 388 p.

HE, Y. *et al.* A modelling approach to evaluate the long-term effect of soil texture on spring wheat productivity under a rain-fed condition. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 1-10, 30 jul. 2014.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**: fundamentals, applications, and environmental considerations. San Diego: Academic Press, 1998. 800 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. Massachusetts: Academic Press, 1980. 413 p

HILLEL, D. **Soil and water**: physical principles and processes. 3. ed. Nova Iorque: Academic Press, 1972. 288 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LIMA, V. C.; MELO, V. F. Perfil do solo e seus Horizontes. In: LIMA, V. C. *et al* (ed.). **O Solo no meio ambiente**: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola - UFPR, 2007. Cap. 2. p. 1-141.

PEREIRA, M. G. *et al.* Formação e caracterização de solos. In: TULLIO, L. (Org.). **Crescimento inicial de milho, soja e feijão e atributos físicos de um Nitossolo Bruno em resposta a diferentes graus de compactação** Formação, classificação e cartografia dos solos. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. cap. 1, p. 1-20.

QUOOS, J. H. **Gerador de Triângulo Textural**. 2016. Disponível em: <http://www.quoos.com.br/index.php/geografia/solos/4-triangulo-textural-solos-argila-areia-silte>. Acesso em: 14 out. 2023.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 119 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Água e sustentabilidade no sistema solo-planta-atmosfera**. Barueri: Manole, 2016. 228 p.

SANTOS, V. S. dos. **Ciclo da água**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/biologia/ciclo-agua.htm>. Acesso em: 14 nov. 2023.

SCOPEL, E. S. **Crescimento inicial de milho, soja e feijão e atributos físicos de um Nitossolo Bruno em resposta a diferentes graus de compactação**. 2023. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2023.



C A P Í T U L O 4

MATÉRIA ORGÂNICA E BIOLOGIA DO SOLO

Douglas Alexandre

Daniela Tomazelli

Rafaela Alves dos Santos Peron

Thiago Ramos Freitas

4.1 INTRODUÇÃO

A biologia do solo é a ciência que estuda as relações ecológicas dos organismos que vivem no solo com os serviços ecossistêmicos, com ênfase na produção de alimentos (Tomazelli et al., 2025). No solo, a vida é encontrada em diferentes escalas, desde seres microscópicos (fungos, bactérias e vírus) até organismos totalmente visíveis a olho nu (minhocas e besouros).

Os organismos que habitam o solo operam na fragmentação de restos vegetais e animais e na decomposição dos fragmentos em partículas cada vez menores, até retornarem ao sistema como nutrientes (N, P, C, entre outros). Esse processo forma a matéria orgânica do solo, que é definida como todo carbono presente no solo na forma de resíduos, em diversos estágios de decomposição, incluindo compostos humificados, materiais carbonizados, associados ou não a fração mineral e a parte viva composta por raízes, micro, meso e macrofauna (Roscoe e Machado, 2002; Tomazelli, Alexandre & Peron, 2024).

Esse é um processo químico e contínuo, denominado dinâmica da matéria, realizado através da atividade biológica de macrofauna, mesofauna e microrganismos do solo. Com isso, o objetivo deste capítulo é demonstrar ao leitor a importância da participação dos agentes biológicos do solo na dinâmica da matéria orgânica.

4.2 A VIDA NO SOLO

4.2.1 Diversidade biológica no solo

A diversidade biológica do solo é composta por uma grande variedade de organismos vivos que habitam os solos, como bactérias, fungos, protozoários, nematoides, minhocas, artrópodes, entre outros, que desempenham papéis fundamentais na manutenção e fertilidade do solo (FAO et al., 2020; Morales, 2021). Esses organismos exercem funções ecológicas essenciais, como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes, a formação e manutenção da estrutura do solo, além do controle biológico de pragas e doenças. De acordo com Bach et al. (2020), a biodiversidade edáfica está diretamente relacionada ao fornecimento de serviços ecossistêmicos essenciais para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, podendo ser agrupada em dois grandes grupos: os micro-organismos e a fauna do solo (Figura 4.1).

Figura 4.1- Diversidade Biológica do Solo: Microrganismos e Fauna Edáfica por Classe de Tamanho.



Fonte: Os autores.

4.2.2 Microrganismos

Os microrganismos do solo constituem a base da biota edáfica e desempenham papéis importantes na produção primária acima do solo, nos ciclos biogeoquímicos, na estruturação do solo e na promoção do crescimento vegetal (Li et al., 2019; Zhao, 2023). Entre os grupos mais representativos da microbiota estão as bactérias, fungos e actinobactérias, cujas funções são complementares e fundamentais para o funcionamento dos ecossistemas terrestres.

As **bactérias** são extremamente abundantes e diversificadas no solo. São responsáveis, por exemplo, pela decomposição da matéria orgânica, convertendo resíduos vegetais e animais em formas assimiláveis por outros organismos (Glick, 2012). Também exercem funções como a fixação biológica de nitrogênio, especialmente por bactérias dos gêneros *Rhizobium* (simbióticas) e *Azotobacter* (livres) (López-Gutiérrez & Orozco-Mosqueda, 2022), além da transformação de nutrientes essenciais para plantas, como a nitrificação, processo em que o amônio é convertido em nitrito e posteriormente em nitrato por bactérias nitrificantes, e a solubilização de fosfatos por meio da secreção de ácidos orgânicos (Smith et al., 2020).

Os **fungos** contribuem para a decomposição de resíduos mais complexos, como a celulose e a lignina, além de formarem associações simbióticas com raízes de plantas, o que aumenta significativamente a absorção de fósforo e outros nutrientes (Johnson; Graham, 2019). Atuam ainda na estabilização da estrutura do solo, pela formação de agregados com partículas minerais.

As **actinobactérias**, embora menos visíveis, possuem grande importância ecológica nos ecossistemas. São conhecidas por sua capacidade de produzir antibióticos naturais, como a estreptomicina, e atuam na decomposição de materiais orgânicos complexos e no controle biológico de patógenos (Kumar et al., 2021). Adicionalmente, participam da biorremediação, promovendo a degradação de contaminantes orgânicos em solos poluídos (Bhattacharyya; Jha, 2016).

4.2.3 Fauna do solo

A fauna do solo é composta pelos organismos que vivem uma parte ou todo o seu ciclo de vida no solo (Moreira; Siqueira; Brussaard, 2008; Lavelle; Spain, 2001). Sua diversidade inclui organismos de diferentes tamanhos e funções, desde microrganismos pequenos até invertebrados maiores. Pode ser classificada em três grupos principais, com base no seu tamanho corporal: microfauna (<0,2 mm), mesofauna (0,2–2,0 mm) e macrofauna (>2,0 mm) (Petersen; Luxton, 1982). Cada grupo tem um papel essencial na estruturação do solo, decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (Wall et al., 2016; Nielsen et al., 2015).

Microfauna: composta por organismos microscópicos, incluindo protozoários, nematoides e alguns rotíferos (Fierer et al., 2009). Esses organismos atuam na decomposição da matéria orgânica, facilitando a liberação de nutrientes essenciais, e na regulação de patógenos. As funções ecológicas dos microrganismos do solo incluem benefícios como a mineralização de nutrientes, a degradação de compostos tóxicos e a regulação de agentes patogênicos (Delgado-Baquerizo et al., 2020). Sua abundância no solo está associada à disponibilidade de umidade e nutrientes, contribuindo para a produção de biomassa e a conservação da biodiversidade (Safaei et al., 2019).

Mesofauna: abrange invertebrados de tamanho intermediário, geralmente entre 0,1 e 2 mm (Morais et al., 2010), como ácaros, colêmbolos, diplópodes juvenis e enchytraeídeos. Esses organismos habitam os espaços entre as partículas do solo e a serapilheira. São fundamentais para a estruturação do solo e promoção de interações biológicas (Bardgett & Van Der Putten, 2014; Ruiter et al., 2020). A mesofauna melhora a porosidade do solo, a aeração e a infiltração de água. É sensível às práticas de uso da terra, sendo indicadores valiosos da saúde do ecossistema terrestre (Duran-Bautista et al., 2020; Baretta et al., 2011). Além disso, serve como presa para organismos maiores, integrando ciclos alimentares (Peron et al., 2023; Chen et al., 2024).

Macrofauna: constituída por invertebrados com mais de 10 mm de comprimento e/ou 2 mm de diâmetro, como minhocas, formigas, centopeias, besouros e outros (Aquino et al., 2008; Brown et al., 2009; Baretta et al., 2011). Esses organismos são responsáveis pela fragmentação da serapilheira (Prescott & Vesterdal, 2021) e pela redistribuição do carbono e do nitrogênio entre frações de matéria orgânica particulada e matéria orgânica associada a minerais (Craig et al., 2022). Também atuam diretamente na ciclagem de nutrientes, influenciando a disponibilidade de elementos essenciais como nitrogênio e fósforo para as plantas (Zhang et al., 2018). A atividade de bioturbação promovida por esses invertebrados contribui para a formação de agregados estáveis, melhorando a retenção de água e protegendo a matéria orgânica da decomposição acelerada. Essa atividade promove ainda a aeração, infiltração de água e alteração do microambiente do solo, afetando os teores de nutrientes como ferro, cálcio, magnésio e alumínio, e influenciando amplamente o ciclo da matéria orgânica (Vidal et al., 2023). A diversidade e abundância da macrofauna são influenciadas por fatores como uso do solo, práticas agrícolas, contaminantes e mudanças climáticas, tornando esses organismos excelentes bioindicadores da saúde do solo (Santos et al., 2024).

4.2.4 Funções Ecológicas

Os organismos do solo exercem um papel essencial na manutenção da funcionalidade dos ecossistemas terrestres, uma vez que influenciam processos físicos e químicos fundamentais para a produtividade vegetal, a qualidade ambiental e o equilíbrio ecológico. Suas funções são diversas, podendo ser agrupadas em categorias principais: decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, formação da estrutura do solo, supressão de patógenos e promoção do crescimento vegetal, além da fixação biológica de nitrogênio e o estabelecimento de micorrizas (Figura 4.1) (Hendrix et al., 1986; Lavelle et al., 1997; Fortuna, 2012).

Quando essas relações ecológicas são preservadas, os organismos edáficos asseguram a funcionalidade do solo, permitindo que ele sustente a vida como meio físico e habitat para animais, plantas e demais organismos. A atividade biológica no solo também é determinante na manutenção do ciclo da água e na dinâmica dos nutrientes essenciais à produção agrícola.

Figura 4.2 – Principais Funções Ecológicas dos Organismos do Solo



Fonte: Os autores.

A seguir, são descritas algumas dessas funções conforme os grupos biológicos envolvidos, como oligoquetas, artrópodes e microrganismos, e sua relação com os processos que garantem a funcionalidade do solo:

4.2.5 Decomposição e ciclagem de nutrientes

A matéria orgânica é um componente indispensável para a manutenção da vida no solo. Sua presença, seja na forma humificada ou em decomposição, sustenta a bioestrutura e a produtividade dos ecossistemas edáficos (Lehmann & Kleber, 2015). Embora amplamente reconhecido, o conceito de matéria orgânica muitas vezes é utilizado de maneira imprecisa, o que compromete a compreensão de suas múltiplas funções no solo.

Segundo Primavesi (1986), matéria orgânica é toda substância morta presente no solo, oriunda de plantas, microrganismos e excreções animais, não incluindo raízes ou organismos vivos. Importante destacar que nem toda matéria orgânica é húmus, e nem todo húmus corresponde à totalidade da matéria orgânica.

A decomposição da matéria orgânica representa uma via fundamental de reciclagem de nutrientes. Microrganismos como bactérias e fungos são os principais agentes da mineralização, processo pelo qual resíduos orgânicos são transformados

em formas minerais assimiláveis pelas plantas, liberando nutrientes como nitrogênio, fósforo, enxofre e potássio (Tomazelli et al., 2024). A fauna do solo — composta por insetos, colêmbolos, aracnídeos, oligoquetas, entre outros — fragmenta os resíduos vegetais e estimula a atividade microbiana, acelerando a decomposição. A interação entre esses grupos biológicos mantém o fluxo contínuo de nutrientes no sistema solo-planta, assegurando a fertilidade e o potencial produtivo do solo (Moreira; Siqueira, 2006).

4.3 FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DO SOLO

A estrutura do solo é formada por meio da agregação de partículas (areia, silte e argila) em aglomerados estáveis, chamados de agregados. Esse processo é diretamente influenciado pela atividade dos organismos do solo. Microrganismos produzem substâncias adesivas que favorecem a coesão entre partículas, enquanto a fauna edáfica, por meio da escavação e movimentação de materiais, contribui fisicamente para a formação e reorganização dos agregados.

Esses agregados proporcionam maior porosidade ao solo, favorecendo a infiltração de água, a circulação de ar e o desenvolvimento radicular. Dessa forma, a estrutura do solo condiciona sua capacidade de reter água e nutrientes, proteger a matéria orgânica e resistir à erosão, fatores essenciais à sua fertilidade e resiliência.

4.4 SUPRESSÃO DE PATÓGENOS E PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO VEGETAL

Os organismos do solo também participam ativamente do controle biológico de patógenos e da promoção do crescimento vegetal. Microrganismos benéficos competem com organismos patogênicos por espaço e recursos, além de produzirem compostos antibióticos e estimularem as defesas naturais das plantas. Esses mecanismos reduzem a incidência de doenças e fortalecem as plantas frente a estresses bióticos.

Além disso, diversos microrganismos produzem substâncias bioativas, como hormônios vegetais, que promovem o crescimento das raízes e melhoram a absorção de nutrientes. A fauna edáfica contribui indiretamente para esses processos ao influenciar a distribuição da matéria orgânica e modular a atividade microbiana no solo.

4.5 FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO E MICORRIZAS

A fixação biológica de nitrogênio é realizada por bactérias que convertem o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas. Essas bactérias podem viver livremente no solo ou em associação simbiótica com raízes de leguminosas. Esse processo reduz a necessidade de fertilizantes nitrogenados e contribui para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Figura 4.3).

As micorrizas, por sua vez, são associações simbióticas entre fungos e raízes de plantas, que ampliam a área de absorção do sistema radicular e aumentam a disponibilidade de nutrientes, principalmente o fósforo (Figura 7.3). Essas associações também melhoram a tolerância das plantas ao estresse hídrico e às doenças, além de promoverem a estabilidade da estrutura do solo.

Figura 4.3 – Interações Simbióticas entre Plantas e Microrganismos:
Fixação Biológica de Nitrogênio e Micorrizas



Fonte: Os autores.

Representação esquemática de interações simbióticas importantes para a nutrição vegetal: (A) Formação do nódulo radicular em leguminosas por bactérias fixadoras de nitrogênio; (B) Associação entre raízes e fungos micorrízicos, evidenciando os dois principais tipos – ectomicorriza e endomicorriza.

4.6 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS)

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente heterogêneo, composta por diferentes frações que se distinguem pela composição, estabilidade e tempo de ciclagem no solo. Na composição do solo, a proporção de matéria orgânica está em torno de 5 %. Dentro dessa fração relativamente pequena de matéria orgânica, encontra-se 95% do carbono orgânico disponível para os processos de mineralização. Desta fração, cerca de 5% compreendem a matéria orgânica viva, composta em sua maioria por microrganismos vivos, também conhecido como biomassa microbiana (Moreira; Siqueira, 2006; Tomazelli et al., 2025).

A matéria orgânica viva é composta pela **biomassa microbiana** é a fração de carbono presente nos microrganismos, e é representada por fungos e bactérias e, em menor proporção, por vírus e protozoários (Fier, 2017; Tomazelli et al., 2025). É um dos compartimentos mais dinâmicos e de onde vem as enzimas que fazem a degradação dos constituintes do material orgânico, como proteínas, ligninas, celulose, entre outros (Bhattacharyya et al., 2022). Essa fração possui um tempo de ciclagem extremamente rápido, variando de dias a semanas, e atua diretamente

na decomposição e mineralização da matéria orgânica, promovendo a liberação de nutrientes essenciais como carbono, nitrogênio e fósforo (Moreira & Siqueira et al., 2006).

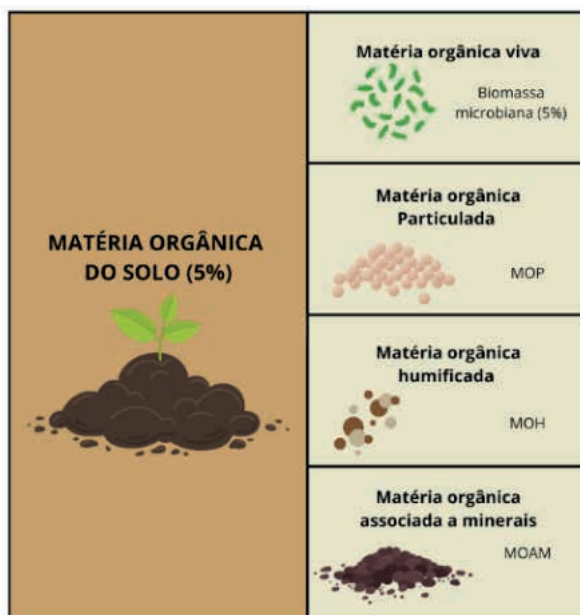
Dentro da matéria orgânica morta, temos a **matéria orgânica particulada (MOP)**, também conhecida como fração leve (Rossi et al., 2012). É composta por resíduos orgânicos em estágio inicial de decomposição, ainda reconhecíveis, como fragmentos de raízes e folhas e o tempo de ciclagem dessa fração é relativamente curto, variando de semanas a poucos anos, considerada sensível as práticas agrícolas (Rossi et al., 2012). Sua função principal é fornecer nutrientes de forma mais imediata para as plantas e microrganismos do solo (Joshi et al., 2024).

Com maior estabilidade e complexidade química, encontramos a **matéria orgânica humificada (MOH)**, formada pelas substâncias húmicas como os ácidos húmicos, fúlvicos e o húmus, originado da hidrólise da lignina através da ação microbiana (Senesi et al., 2009). E possui tempo de ciclagem mais longo, podendo durar de décadas a séculos (Moreira; Siqueira, 2006). A matéria orgânica humificada é fundamental para a estruturação do solo, retenção de água e nutrientes, além de contribuir para a estabilidade da matéria orgânica (Martin-Neto et al., 2023).

A **matéria orgânica associada a minerais (MOAM)**, também chamada de fração organomineral, os compostos orgânicos encontram-se intimamente ligados às partículas minerais do solo, especialmente argilas e siltes (Rossi et al., 2012). Essa associação promove uma proteção física e química contra a decomposição, fazendo com que esse compartimento tenha o tempo de ciclagem mais longo de todos, podendo se estender por séculos ou até milênios. Além de representar o maior reservatório de carbono estável no solo, essa fração tem papel importante na resiliência dos ecossistemas e no sequestro de carbono (Yu et al., 2022).

Todos os compartimentos da Matéria orgânica (Figura 4.4), sendo vivo (Biomassa microbiana) ou morto (MOP, MOH, MOAM) são fundamentais para a agregação do solo, estruturação, capacidade de reter umidade e fertilidade e o suporte a vida do solo, que mantem a ciclagem da Matéria orgânica sempre ativa.

Figura 4.4 – Compartimentos da Matéria Orgânica do Solo (MOS) e suas Frações Constituintes.



Fonte: Os autores.

A matéria orgânica do solo representa aproximadamente 5% da composição do solo e é composta por quatro principais frações: biomassa microbiana viva, matéria orgânica particulada (MOP), matéria orgânica humificada (MOH) e matéria orgânica associada a minerais (MOAM). Cada fração desempenha funções ecológicas e químicas distintas, influenciando a fertilidade e estabilidade do solo.

4.7 MANEJO SUSTENTÁVEL DA BIOLOGIA E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Práticas agrícolas que preservam a matéria orgânica são fundamentais para a agricultura e manutenção da vida no solo. Entre essas práticas, destacam-se a rotação de culturas, plantio direto, consórcio gramínea e leguminosa, cobertura vegetal e adubação verde, sistemas de integração, ntemperizado, entre outras práticas.

A rotação de culturas é uma prática agrícola que consiste na sucessão de diferentes tipos de plantas em uma mesma área ao longo do tempo, com o objetivo de melhorar a produtividade, preservar a fertilidade do solo e reduzir o uso de defensivos químicos (Lourente et al., 2010). Essa é uma prática que aumenta a

atividade de micro e macroorganismos benéficos, devido à diversificação de fontes de vegetais, favorecendo a simbiose com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), que contribuem no aumento da produção de massa, intensificam a fotossíntese e ajudam a drenar carbono da atmosfera para o solo (Garcia, Li; Rosalem, 2013; Raphael et al., 2016).

O Plantio direto é uma prática agrícola conservacionista essencial para regiões tropicais e subtropicais. Esse sistema consiste na semeadura direta do solo coberto com uma camada de palha, evitando o revolvimento e exposição da Matéria orgânica (MO). Essa cobertura protege não só a matéria orgânica da degradação, mas reduz a erosão, conserva a umidade e favorece a atividade microbiana. Além disso, o plantio direto melhora a estrutura do solo, aumenta sua capacidade de retenção de água e contribui para o sequestro de carbono, promovendo um sistema agrícola mais sustentável (Tormena et al., 2018; Man et al., 2021).

O consórcio entre gramínea e leguminosa contribui significativamente para o aporte de nitrogênio no solo, através da fixação biológica do nitrogênio (FBN). Esse processo é realizado por bactérias associadas às raízes das leguminosas, que reduzem o nitrogênio atmosférico (N_2) a amônia (NH_3), uma forma assimilável pelas plantas. Durante a senescência do material vegetal, a biomassa das leguminosas é decomposta e o nitrogênio orgânico é liberado no solo, promovendo a mineralização da matéria orgânica e estimulando a atividade de microrganismos decompositores, como bactérias e fungos. Além de melhorar a fertilidade do solo, essa prática reduz a necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos e contribui para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

A adubação verde é uma prática que se baseia na utilização de espécies vegetais, principalmente leguminosas, cultivadas com o objetivo de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Calegari et al., 1993), na manutenção da matéria orgânica, além da fixação de nitrogênio e reciclagem de nutrientes, a fim de tornar o solo mais fértil, recuperando solos degradados, melhorando os índices de produção de solos pobres e conservando solos altamente produtivos (Espíndola et al., 1997; Abranches et al., 2021; Silva et al., 2024).

4.8 MÉTODOS DE ANÁLISE DA BIOLOGIA E DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

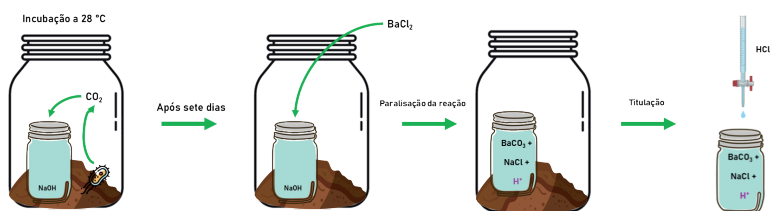
A avaliação da qualidade biológica do solo e da matéria orgânica é fundamental para compreender a funcionalidade dos ecossistemas edáficos e subsidiar práticas agrícolas sustentáveis (Kimpe; Warkentin, 1998). Diversos métodos têm sido desenvolvidos para medir a atividade biológica, a presença de microrganismos e o conteúdo e qualidade da matéria orgânica, fornecendo indicadores importantes sobre a saúde do solo. A seguir, são apresentados os principais métodos utilizados para esse fim.

4.9 INDICADORES BIOLÓGICOS

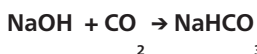
A análise biológica do solo visa medir a atividade microbiana e fornecer informações sobre a saúde e funcionalidade do ecossistema edáfico. Os dois principais indicadores são:

4.10 RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO (RBS)

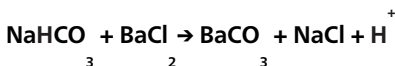
A respiração basal do solo mede a emissão de dióxido de carbono (CO_2) produzida pela atividade respiratória dos microrganismos no solo (Silva et al., 2007). O método mais comum consiste na incubação de amostras de solo em frascos fechados, onde a liberação de CO_2 é absorvida por uma solução alcalina (geralmente NaOH ou KOH) e posteriormente titulada com ácido. A quantidade de CO_2 liberado é proporcional à atividade biológica. Altos níveis indicam maior atividade microbiana e decomposição da matéria orgânica (Jenkinson; Powlson, 1976).



O NaOH colocado no frasco pequeno, captura CO liberado pela respiração microbiana do solo, formando bicarbonato de sódio (NaHCO_3):



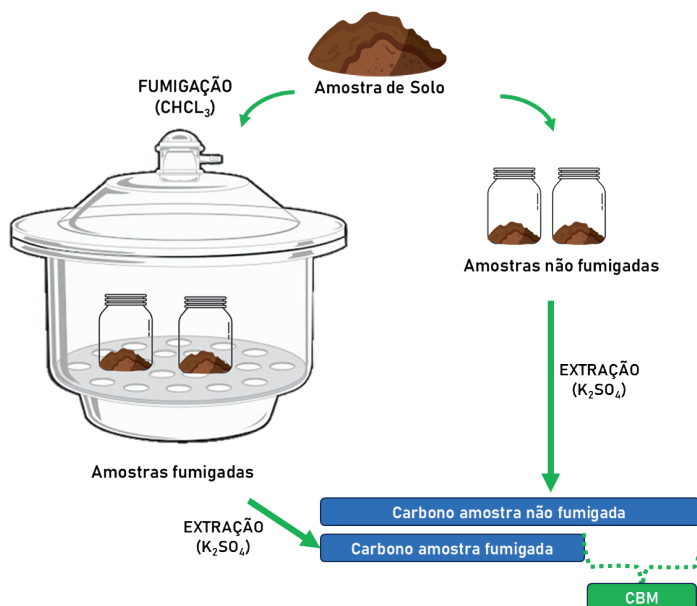
Após a paralisação com cloreto de bário (BaCl_2) é formado carbonato de bário (BaCO_3) e liberado H^+ que torna o meio ácido:



Essa acidificação permite a titulação do excesso de NaOH não reagido com ácido padrão (HCl), possibilitando quantificar indiretamente o CO_2 liberado pela respiração microbiana, com base na diferença entre o NaOH inicial e o que sobrou.

4.11 CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA (CBM)

O Carbono da Biomassa microbiana representa a quantidade de microrganismos vivos no solo. Pode ser medida por métodos diretos, como a contagem celular por microscopia, ou métodos indiretos, como a **Fumigação-extração** que compara o carbono extraído de amostras de solo fumigadas com clorofórmio (que mata os microrganismos) e não fumigadas, permitindo estimar a biomassa microbiana com base na diferença (Vance et al., 1987).



Esses indicadores são amplamente utilizados para monitorar o impacto de práticas agrícolas, o uso do solo e mudanças ambientais, permitindo diagnósticos da saúde do solo.

qCO₂ (quociente metabólico do solo)

O quociente metabólico do solo é o índice obtido pela razão entre a respiração basal do solo (CO₂ liberado) e a biomassa microbiana. Ele reflete a eficiência metabólica da microbiota. Valores altos de QCO₂ conforme equação 1 abaixo indicam um sistema estressado ou degradado, onde os microrganismos consomem mais energia para sobreviver, enquanto valores baixos indicam um sistema estável e eficiente na utilização de recursos (Anderson; Domsch, 1993; Silva et al., 2007).

$$qCO_2 \frac{RBS}{CBM} \quad (1)$$

Em ambientes degradados, como solos compactados, contaminados ou com baixa disponibilidade de nutrientes, os microrganismos precisam despende mais energia apenas para manter suas funções vitais, o que resulta em uma maior liberação de CO₂ por unidade de biomassa. Nesse cenário, há uma perda maior de carbono na forma de CO₂ para a atmosfera do que o acúmulo de carbono na biomassa microbiana, caracterizando um sistema ineficiente em termos de ciclagem e retenção de carbono. Por isso, o qCO₂ é um indicador sensível de distúrbios ambientais e da qualidade biológica do solo.

4.12 ANÁLISES DA MATÉRIA ORGÂNICA

A matéria orgânica do solo é um componente chave da fertilidade, estabilidade estrutural e capacidade de retenção de nutrientes. As análises a seguir ajudam a avaliar tanto a **quantidade** quanto a **qualidade** dessa matéria.

4.13 CARBONO ORGÂNICO TOTAL (COT)

O Carbono orgânico total quantifica o teor total de carbono presente na matéria orgânica do solo. É geralmente realizado por meio de combustão seca em analisadores elementares (como CHNS), onde o carbono é oxidado a CO₂ e medido por detecção infravermelha, ou por métodos de oxidação úmida (Walkley-Black), onde o carbono orgânico é oxidado por dicromato de potássio em meio ácido. O COT é um dos principais indicadores da quantidade de matéria orgânica no solo, sendo útil para avaliar a fertilidade e o potencial de sequestro de carbono.

4.14 FRAÇÕES HÚMICAS

As frações húmicas correspondem aos diferentes compostos orgânicos presentes no solo, classificados conforme sua solubilidade:

- I **Ácidos fúlvicos**: solúveis em água em todos os pHs.
- I **Ácidos húmicos**: solúveis em meio alcalino, mas insolúveis em ácido.
- I **Humina**: insolúvel tanto em ácidos quanto em bases.

TESTE SEU CONHECIMENTO ☺

1. Quais são os principais grupos de organismos que compõem a biota do solo e de que forma eles contribuem para os serviços ecossistêmicos?
2. Explique a diferença entre matéria orgânica viva e matéria orgânica morta no solo. Quais são as principais frações de cada uma?
3. Descreva pelo menos três funções ecológicas desempenhadas pelos organismos do solo e sua importância para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.
4. Quais práticas de manejo favorecem a manutenção ou o aumento da matéria orgânica do solo? Justifique sua resposta com base nas funções da MOS.
5. O que é o quociente metabólico do solo (qCO_2) e o que ele indica sobre a saúde do ecossistema edáfico?
6. Compare os métodos de análise “Respiração Basal do Solo” e “Carbono da Biomassa Microbiana”. Quais informações eles fornecem e como podem ser aplicados na avaliação da qualidade biológica do solo?

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANCHES, M. de O.; SILVA, G. A. M. da; SANTOS, L. C. dos; PEREIRA, L. F.; FREITAS, G. B. de. Contribuição da adubação verde nas características químicas, físicas e biológicas do solo e sua influência na nutrição de hortaliças. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 10, n. 7, p. e7410716351, 2021.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Chemistry*, Oxford, v. 25, n. 3, p. 383-395, 1993.

AQUINO, A. M. de; CORREIA, M. E. F.; ALVES, M. V. Diversidade da macrofauna edáfica no Brasil. In: MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O.; BRUSSAARD, L. (org.). *Biodiversidade do solo em ecossistemas tropicais*. Lavras: Editora da UFLA, 2008. P. 143–170.

BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, v. 515, n. 7528, p. 505–511, 2014.

BARETTA, D. et al. Fauna edáfica e qualidade do solo. *Tópicos em Ciec. Faça Solo*, v. 7, p. 119–170, 2011.

BHATTACHARYYA, S. S. et al. Soil carbon sequestration – an interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. *Science of the Total Environment*, v. 815, p. 152928, 2022.

BROWN, G. G. et al. Macrofauna do solo em sistemas agroflorestais e Mata Atlântica em regeneração nos municípios de Barra do Turvo, SP, e Adrianópolis, PR. Colombo: Embrapa Florestas, 2009. 51 p.

CALEGARI, A. et al. Aspectos gerais de adubação verde. In: COSTA, M. B. B. (org.). *Adubação verde no sul do Brasil*. [S. l.: s. n.], 1993. P. 1–55.

CHEN, W. et al. Increased connections among soil microbes and microfauna enhance soil multifunctionality along a long-term restoration chronosequence. *Journal of Applied Ecology*, v. 61, n. 6, p. 1359–1371, 2024.

CRAIG, M. et al. Rapidly decomposing litter increases soil carbon in temperate forests, but not through microbial physiological traits. *Nature Communications*, v. 13, p. 1229, 2022.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring Soil Biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 8, n. 3, p. 209–213, 1976

MORAIS, J. W. de; OLIVEIRA, V. dos S.; DAMBROS, C. de S.; TAPIA-CORAL, S. C.; ACIOLI, A. N. S. Mesofauna edáfica em diferentes sistemas de uso do solo no alto rio Solimões, AM, Brasil. *Neotropical Entomology*, v. 39, n. 2, p. 145–152, 2010.

DELGADO-BAQUERIZO, M. et al. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution*, v. 4, n. 2, p. 210–220, 2020. DOI: 10.1038/s41559-019-1084-y.

DURAN-BAUTISTA, E. H. et al. Cupins como indicadores de serviços ecossistêmicos do solo em paisagens amazônicas transformadas. *Ecological Indicators*, v. 117, p. 106550, 2020.

ESPÍNDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L. *Adubação verde: estratégia para uma agricultura sustentável*. [S. l.], 1997.

FIERER, N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, v. 15, p. 579–590, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>.

FIERER, N. et al. The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land use. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 41, n. 12, p. 862–872, 2009. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.01.011.

FILGUEIRAS, J. A. et al. Soil mesofauna and nutrient cycling: a review. *Applied Soil Ecology*, v. 146, p. 103353, 2020.

GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter and physical attributes affected by crop rotation under no-till. *Soil Science Society of America Journal*, v. 77, n. 5, p. 1724–1731, 2013.

JOSHI, P. et al. Complexation by particulate organic matter alters iron redox behavior. *ACS Earth and Space Chemistry*, v. 8, n. 2, p. 310–322, 2024.

KIMPE, C. R.; WARKENTIN, B. P. Soil functions and the future of natural resources. *Advances in GeoEcology*, [S.l.], v. 31, p. 3-10, 1998.

LAVELLE, P.; SPAIN, A. V. *Soil ecology*. Dordrecht: Springer, 2001.

LEITE, L. F. C. *Matéria orgânica*. Documentos EMBRAPA, 2004.

LOURENTE, E. R. P. et al. Rotação de culturas e relações com atributos químicos e microbiológicos do solo e produtividade do milho. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, n. 4, p. 829–842, 2010.

MAN, M. et al. Long-term crop rotation and different tillage practices alter soil organic matter composition and degradation. *Soil and Tillage Research*, v. 209, p. 104960, 2021.

MARTIN-NETO, L. et al. Estrutura e natureza química da matéria orgânica do solo. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P. (org.). *Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical*. P. 145–184, 2023.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O.; BRUSSAARD, L. *Biologia e fertilidade do solo*. 2. Ed. Lavras: UFLA, 2008.

NIELSEN, U. N. et al. Diversity of soil fauna affects soil processes: a study across habitats. *Ecology Letters*, v. 18, n. 7, p. 641–651, 2015.

ORMENA, C. A. et al. Qualidade estrutural e carbono do solo em sistemas de plantio direto com diferentes rotações de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, 2018.

PERON, R. A. S. dos et al. Grassland management intensification affects the soil fauna in a subtropical highland. *Annals of Applied Biology*, 2023.

PETERSEN, H.; LUXTON, M. A survey of the main animal taxa of detritus food web. *Oikos*, v. 39, p. 293–294, 1982.

PRESCOTT, C. E.; VESTERDAL, L. Decomposition and transformations along the litter-to-soil organic matter continuum in forest soils. *Forest Ecology and Management*, v. 498, p. 119522, 2021.

RAPHAEL, J. P. et al. Soil organic matter in crop rotations under no-till. *Soil and Tillage Research*, v. 155, p. 45–53, 2016.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. *Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica*. Dourados: EMBRAPA, 2004.

ROSSI, C. Q. et al. Frações lábeis da matéria orgânica em sistema de cultivo com palha de braquiária e sorgo. *Revista Ciência Agronômica*, v. 43, p. 38–46, 2012.

SAFAEI, M. et al. Evaluation of land use/cover change impacts on soil functions using landscape function analysis and soil quality indicators in semi-arid natural ecosystems. *Ecological Indicators*, v. 106, p. 105538, 2019.

SANTOS, J. P. et al. Soil macrofauna are important bioindicators of soil quality in different land uses. *Ecological Indicators*, v. 150, 2024.

SENESI, N.; XING, B.; HUANG, P. M. *Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 884 p.

SILVA, R. G. S. R. da et al. Rotação de cultura com o uso de adubação verde no plantio de milho: uma possível alternativa para aumento de produção e diminuição dos custos com adubação mineral. *Scientific Electronic Archives*, v. 17, n. 6, 2024.

SILVA EE et al. Determinação de Respiração Basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). Embrapa; 2007. P. 4. Comunicado Técnico, no. 99. 2007.

SOUZA, M. H. et al. Macrofauna do solo. *Enciclopédia Biosfera*, v. 11, n. 22, 2015.

TOMAZELLI, D. et al. Transformações microbianas do carbono no solo. In: TOMAZELLI, D.; GOSS-SOUZA, D.; OLIVEIRA FILHO, L. C.; KLAUBERG-FILHO, O. (org.). *Biologia do solo: conceitos e aplicações nas ciências agrárias*. Rio de Janeiro: Freitas e Bastos, 2025.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 19, p. 703-707, 1987.

VIDAL, A. et al. The role of earthworms in agronomy: consensus, new insights and remaining challenges. *Advances in Agronomy*, v. 181, p. 1–78, 2023.

WALL, D. H. et al. Soil biodiversity and ecosystem services: the bridge between agriculture and conservation. *Agricultural Ecosystems & Environment*, v. 226, p. 24–34, 2016.

YU, W. et al. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? *Soil Biology and Biochemistry*, v. 172, p. 108756, 2022.

ZHANG, W. et al. Impacts of soil fauna on nitrogen and phosphorus release during litter decomposition. *Journal of Forestry Research*, v. 29, p. 147–155, 2018.



CAPÍTULO 5

SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (SIBCS)

Mari Lucia Campos

Jordana dos Anjos Xavier

Carolina Ayumi Kaneji Abatt

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) é a metodologia oficial adotada no Brasil para a classificação taxonômica dos solos. Desenvolvido e coordenado pela Embrapa Solos, em parceria com diversas instituições de ensino e pesquisa, o SiBCS foi concebido na década de 1970 e tem sido continuamente aperfeiçoado, sendo amplamente utilizado em levantamentos pedológicos, estudos de uso e manejo do solo, além de embasar políticas públicas e normativas ambientais.

O sistema segue um modelo hierárquico e multicategórico, dividido em seis níveis: ordens, subordens, grandes grupos, subgrupos, famílias e séries. Essa estrutura permite uma classificação progressivamente detalhada, desde características gerais dos solos, associadas a processos pedogenéticos amplos, até propriedades locais específicas. Cada nível é determinado por atributos diagnósticos, como presença de horizontes pedogenéticos e características físicas, químicas ou mineralógicas.

As ordens representam o nível mais amplo da classificação, sendo definidas por atributos gerais relacionados à gênese do solo. Atualmente, o SiBCS reconhece 13 ordens (tabela 5.1 e figura 5.1), estabelecidas de acordo com as condições ambientais brasileiras e as características predominantes dos solos tropicais. Entre as mais representativas estão:

Os **Latossolos** são solos altamente intemperizados, com horizonte B latossólico (Bw), estrutura granular e elevada profundidade. Apresentam boa permeabilidade e estabilidade física, mas baixa fertilidade natural. São amplamente distribuídos no Brasil e ocupam grandes áreas agrícolas, exigindo manejo intensivo de nutrientes para uso sustentável.

Os **Argissolos** possuem horizonte B textural (Bt), caracterizado pelo acúmulo de argila por iluviação. Apresentam nítido contraste textural entre os horizontes superficiais e subsuperficiais. São comuns em relevo ondulado a montanhoso e requerem manejo conservacionista para controle da erosão e manutenção da fertilidade.

Os **Cambissolos** apresentam horizonte B incipiente (Bi), com evidências iniciais de desenvolvimento pedogenético. Possuem variabilidade em textura, drenagem e fertilidade, sendo encontrados em diversas regiões do país. São comuns em áreas de relevo movimentado e exigem manejo adequado para evitar processos erosivos.

Os **Neossolos** são solos jovens, com perfil pouco desenvolvido e ausência de horizonte B diagnóstico. Podem apresentar grande variabilidade em textura e fertilidade, dependendo do material de origem. São comuns em áreas de deposição recente, encostas e ambientes de formação recente, com uso agrícola geralmente limitado.

A classificação baseia-se na identificação de horizontes diagnósticos, que são camadas específicas do perfil do solo utilizadas como critérios taxonômicos. O horizonte A representa a camada superficial, rica em matéria orgânica e biologicamente ativa. O horizonte B é marcado pelo acúmulo de argila, óxidos de ferro ou matéria orgânica, e é determinante para o reconhecimento de diversas classes. Já o horizonte C corresponde ao material de origem, pouco alterado pelos processos pedogenéticos. Além dos horizontes, atributos como saturação por bases, textura, cor (Munsell), capacidade de troca catiônica (CTC), mineralogia e teor de matéria orgânica são considerados fundamentais na definição das classes.

O SiBCS tem grande relevância para a agricultura, engenharia civil, planejamento urbano e conservação ambiental. A correta classificação dos solos permite identificar suas potencialidades e limitações, orientando o uso sustentável e o manejo adequado. Na agricultura, por exemplo, o SiBCS orienta práticas de correção e adubação, enquanto em estudos ambientais permite identificar áreas sensíveis, como os Organossolos, que demandam estratégias específicas de conservação. Também é um importante instrumento de integração internacional, mantendo correlação com sistemas como o Soil Taxonomy e a World Reference Base for Soil Resources (WRB).

Desde a publicação de sua primeira edição em 1999, o SiBCS passou por atualizações periódicas, sendo a edição mais recente datada de 2018. Essas atualizações incorporam avanços científicos, novos critérios classificatórios e sugestões da comunidade técnico-científica. As reuniões de correlação de solos realizadas em diferentes regiões do país são fundamentais nesse processo, permitindo a adequação do sistema às diversas realidades pedológicas do Brasil.

No primeiro nível categórico, atualmente são reconhecidas as seguintes 13 ordens: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvissolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos. Essas denominações são formadas pela combinação de um elemento formativo com a terminação “solos”, conforme estabelecido pelo SiBCS.

Tabela 5.1. Principais ordens de solos do Brasil, segundo o SiBCS da Embrapa, e seus respectivos horizontes diagnósticos

Ordem de Solo	Horizonte Diagnóstico	Descrição resumida
Argissolo	Horizonte B textural (Bt)	Acúmulo de argila por iluviação
Cambissolo	Horizonte B incipiente (Bi)	Horizonte subsuperficial jovem, incipiente
Chernossolo	Horizonte A chernozêmico	Epipedon escuro, rico em matéria orgânica e alto saturação por bases
Espodossolo	Horizonte B espódico	Acúmulo subsuperficial de matéria orgânica, Fe e/ou Al
Gleissolo	Horizonte glei	Indícios de saturação e feições redox (cinza)
Latossolo	Horizonte B latossólico (Bw)	Solo muito ntemperizados, rico em óxidos de Al/Fe
Luvissolo	Horizonte B textural (Bt)	Similar a argissolo, mas com alta saturação por bases
Neossolo	Ausência de horizonte B	Perfil pouco desenvolvido sem horizonte diagnóstico
Nitossolo	Horizonte B nítico (Bn)	Presença de agregados brilhantes, estrutura forte
Organossolo	Horizonte Hístico (H/O)	Camada orgânica espessa (>80 g kg ⁻¹)
Planossolo	Horizonte B plânico	Camada subsuperficial compacta, argila dispersa
Plintossolo	Horizonte plíntico	Plintita cimentada formando camadas endurecidas
Vertissolo	Horizonte vértico	Argilas expansivas, fissuras e cerosidade

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2018)

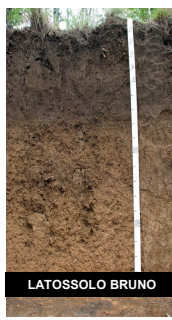
A 6ª edição do livro Sistema Brasileiro de Classificação de Solos publicado em junho de 2025 pode ser acessado em <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1176834/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>.



ARGISSOLO



NITOSSOLO BRUNO



LATOSSOLO BRUNO



LATOSSOLO VERMELHO



NEOSSOLO QUARTZARÊNICO



ORGANOSSOLO FÓLICO



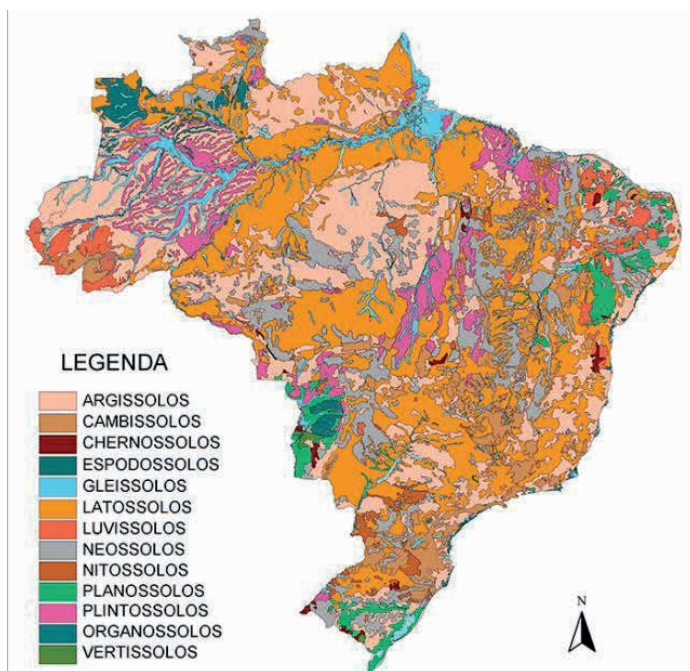
NEOSSOLO

Exemplos de Solos de Santa Catarina.

Fotos: Jaime Antônio Almeida e Mari Lucia Campos

A figura 5.1 apresenta a distribuição das Classes de solos do Brasil. Para acessar ao novo mapa de solos do Brasil na escala 1:5.000.000, atualizado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2006), use o link <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/920267>. O acesso ao boletim e mapa de solos de Santa Catarina (1998), pode ser realizado por <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/964417?mode=full>.

Figura 5.1. Mapa de solos do Brasil na escala 1:5.000.000. Um melhor conhecimento do solo do nosso país permitirá a execução de mapas com melhor escala.



Fonte: EMBRAPA, 2025

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Acesso disponível em <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2025. Acesso disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2062813/solo-brasileiro-agora-tem-mapeamento-digital>



C A P Í T U L O 6

SOLOS FLORESTAIS

Betel Cavalcante Lopes

Gabriela dos Santos Castro

O solo é um componente de suma importância do ecossistema terrestre, pois, além de ser o principal substrato utilizado pelas plantas para o seu desenvolvimento, exerce ainda uma multiplicidade de funções como: distribuição, regulação e infiltração da água, armazenamento e ciclagem de nutrientes essenciais e outros elementos, além de exercer ação filtrante e protetora da qualidade da água e do ar (Brady, 2013).

De acordo com Wilde (1958), o solo florestal é uma porção da superfície terrestre que serve como meio de sustentação da floresta; constituído por material mineral e orgânico, permeado por diferentes teores de água e ar, além de ser habitado por organismos e exibir características peculiares adquiridas sob influência de três fatores pedogenéticos não comumente encontrados em outros solos: resíduos florestais, raízes das árvores e organismos específicos, cuja existência depende da presença da cobertura florestal. Esses aspectos peculiares aos solos florestais são fundamentais em seu processo de evolução, condicionando uma série de características.

A origem de um solo florestal depende de vários fatores bióticos e abióticos, sendo influenciado principalmente pelo material de origem, a topografia, o clima e a fauna do solo. O produto resultante dessas ações é que irá definir o tipo de vegetação que irá ocorrer em determinada região, e ainda indicar a composição de espécies. Alvin e Araújo (1953) constataram que a distribuição do cerrado, dentro do seu próprio limite fitogeográfico, é regulada mais pelo solo do que por qualquer outro fator ecológico.

As formações florestais, como florestas tropicais, equatoriais, coníferas, são resultados da ação do clima aliado ao material pedológico existente em cada local. Além disto, as propriedades do solo sob floresta são principalmente influenciadas pela vegetação associadas à sua serrapilheira, atividade da raiz e microclima (Ollinger et al. 2002; Tsui et al. 2004; Kara; Bolat, 2008).

De acordo com Rossi et al. (2005), o conhecimento do relacionamento entre solo e vegetação é essencial ao manejo de áreas de preservação. Dentre os fatores que interferem na formação e no entendimento da paisagem, o solo desempenha papel fundamental, fornecendo suporte mecânico e nutrientes para o estabelecimento e desenvolvimento das plantas, além de refinar o modelado do relevo. O estabelecimento de relações diretas ou indiretas entre solo e vegetação é pouco estudado, principalmente, em áreas pouco alteradas.

No âmbito das atividades do setor florestal, o solo desempenha importantes funções relacionadas à manutenção dos índices de produtividade, sendo o entendimento de suas propriedades e mecanismos fundamental para se alcançar a eficiência esperada das práticas de manejo e a sustentabilidade de um sistema florestal, seja este voltado à obtenção de produtos ou à conservação dos recursos naturais (Rovedder et al. 2013)

Portanto, o solo florestal é fundamental para o ecossistema, pois influencia diretamente na regeneração e estabelecimento da vegetação florestal e no seu consequente desenvolvimento.

6.1 NUTRIENTES

As florestas, além de absorverem dióxido de carbono atmosférico para o seu crescimento, também consomem diversos nutrientes presentes no solo, como potássio, cálcio, magnésio, nitrogênio e fósforo. Após serem absorvidos pelas raízes, esses nutrientes são incorporados às diferentes partes da árvore, como folhas, cascas, lenho e ramos.

O solo é o principal depositário dos nutrientes minerais, sejam reservas naturais ou decorrentes da aplicação de fertilizantes e corretivos. Os minerais das frações silte e areia são importantes, pois são fontes potenciais de nutrientes para as plantas e outros seres vivos que habitam o solo. À medida que o solo evolui e os minerais primários (exceção do quartzo), se decompõem são liberados lentamente os nutrientes neles contidos. No entanto, devido essa liberação de nutrientes ocorrerem de forma lenta, em plantios florestais faz-se necessário à adubação do solo.

De acordo com Barros et al. (2005), quanto mais produtiva a plantação florestal, maior será sua demanda de nutrientes. Para uma produtividade de $40 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, aos sete anos de idade, um povoamento de eucalipto conterá, aproximadamente, de 25 kg ha^{-1} de fósforo a 400 kg ha^{-1} de cálcio. Portanto, inicialmente, o produtor deve ter a ideia mais precisa possível sobre a produtividade a ser obtida na área a ser cultivada. Os nutrientes absorvidos são distribuídos na árvore, sendo sua alocação, nos vários órgãos, variável de acordo com a idade da planta. Em idades mais jovens, uma maior proporção é alocada na copa (folhas e galhos mais finos) e, em idades mais adultas, no tronco (casca e lenho).

A estimativa da disponibilidade de nutrientes no solo não é tão simples. A isso se soma a interferência da planta, no que se refere à profundidade de exploração, morfologia, arquitetura do sistema radicular, eficiência de absorção do nutriente, associação micorrízica etc. A amostragem para avaliação da fertilidade do solo no cultivo de espécies florestais tem sido feita, no Brasil, nas camadas de 0 a 20 e de 20 a 40 cm de profundidade, em razão da maior concentração de raízes finas (diâmetro menor do que 2 mm) observada, em geral, nessas camadas (Barros et al. 2005).

6.2 PH DO SOLO

Muitos solos de florestas tropicais são naturalmente ácidos devido à intensa lixiviação de nutrientes pelas fortes chuvas e à decomposição rápida da matéria orgânica. Isso pode tornar alguns nutrientes, como cálcio e magnésio, menos disponíveis para as plantas. A deficiência de Ca e a toxidez de Al são as principais limitações químicas para o crescimento radicular, cujas consequências se manifestam pelo estresse nutricional e hídrico nas plantas (Franchini et al. 2001).

Solos com acidez elevadas podem afetar no crescimento das culturas florestais, pois poderá ocorrer a elevação de alumínio e manganês, os quais se tornam solúveis em solos com acidez elevada, podendo atingir níveis tóxicos. O crescimento das raízes é altamente sensível ao alumínio, afetando assim a absorção de nutrientes e água pela planta.

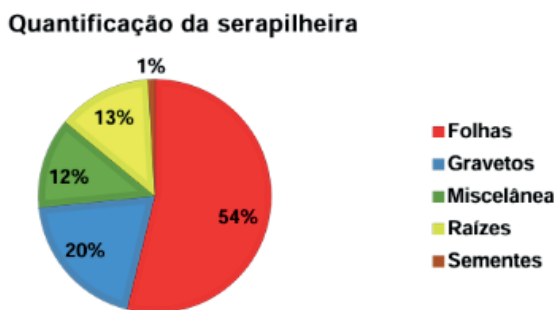
A elevação do pH e a neutralização do Al podem ser obtidas com a aplicação de calcário. O uso desse corretivo, além de corrigir a acidez, melhora as condições físicas do solo, estimula a sua atividade microbiana, faz com que alguns elementos minerais sejam mais disponíveis às plantas e, no caso de o solo ser cultivado com árvores leguminosas, melhora a fixação simbiótica do nitrogênio. Além disso, a aplicação de calcário (principalmente o dolomítico) tem também como objetivo fornecer Ca e Mg para as plantas (Belote; Neves, 2001).

6.3 MATÉRIA ORGÂNICA

A serrapilheira encontrada em sistemas florestais é uma importante fonte de matéria orgânica para o solo. Situada na camada superficial do solo, ela é composta pela fração folha, galhos, caules, flores, restos de organismos vivos, detritos, solos, entre outros (Costa et al. 2010). Em uma floresta, em média, 60 a 80% do material depositado é constituído de folhas. À medida que os materiais da serrapilheira se decompõem, são liberados nutrientes essenciais para as plantas e microrganismos do solo, contribuindo para a fertilidade do solo e a produtividade do ecossistema.

Na figura 6.1 podemos observar a constituição da serrapilheira de uma floresta de terra firme na Amazônia. Está área se encontra sob plano de manejo sustentável.

Figura 6.1- Quantificação de serrapilheira de uma floresta de terra firme na Amazônia utilizada para exploração florestal sustentável.



Fonte: Oliveira (2018).

De acordo com Caldeira et al. (2007), a quantidade de serrapilheira que se acumula sobre o solo florestal irá depender de alguns fatores, como o estágio sucessional, espécies presentes, a idade, o tipo de floresta, condições climáticas, taxa de decomposição. Além disto, outros fatores podem influenciar, como o baixo nível de nutrientes na serrapilheira e no solo, condições desfavoráveis para a decomposição, como o déficit de água no solo e na serrapilheira, pH alto ou baixo, baixa densidade da população de organismos decompositores, além da época de coleta e estação do ano (O'Connell;Sankaran, 1997).

Em florestas de regiões tropicais com maiores temperaturas e maiores precipitações pluviométricas exibem um maior estímulo de degradação da serrapilheira, pois favorecem a ação decompositora, além de ser um ambiente favorável ao crescimento vegetal, e, portanto, a deposição de biomassa (Dalmolin et al. 2009).

De acordo com Cianciaruso et al. (2006), a qualidade nutricional da serrapilheira, determinada por suas características físicas e químicas, atrai e modula a ação dos organismos decompositores. Por outro lado, o solo com suas características físicas e químicas, como a porosidade, granulometria, aeração e teor de matéria orgânica, também exerce influência sobre a atividade da microbiota edáfica e, consequentemente, sobre as taxas de decomposição da serrapilheira. Isso, por sua vez, reflete na qualidade do solo no qual a serrapilheira se deposita (Costa et al. 2010). Como evidenciado, esses processos ecossistêmicos estão interligados, de modo que a qualidade de um deles influencia a qualidade do outro e o funcionamento do ecossistema em que estão inseridos (Hernández, 2014).

A serapilheira desempenha dois papéis fundamentais nos ecossistemas florestais: faz parte essencial do ciclo de nutrientes e atua como uma camada protetora da superfície do solo. Ela regula as condições microclimáticas, modifica o ambiente e influencia espécies que são sensíveis à sua acumulação (Sousa, 2007).

Por tanto, a análise da quantidade de serapilheira acumulada no solo fornece informações cruciais sobre os processos de decomposição da serapilheira e a atividade biológica no solo florestal. A quantidade de serapilheira presente no solo é um reflexo das entradas e saídas de material orgânico, ou seja, representa o que permanece no solo em comparação com o que foi originalmente depositado como serapilheira.

6.4 A IMPORTÂNCIA DA FAUNA EDÁFICA NA DINÂMICA DE SOLOS FLORESTAIS

A fauna edáfica refere-se ao conjunto de organismos que vivem dentro do solo ou em sua superfície imediata, sendo geralmente divididos em três grupos funcionais: microfauna (< 0,2 mm), mesofauna (0,2-2 mm) e macrofauna (>2 mm) (Silva et al. 2022). A microfauna consiste em animais microscópicos e inclui protozoários, nematoides, rotíferos e tardígrados que vivem dentro da lâmina de água no solo. Se alimentam essencialmente de outros animais, raízes das plantas (parasitas/predadores) e micro-organismos - bactérias, protozoários, fungos, algas, actinomicetos (Lavelle, 1997). A mesofauna inclui organismos maiores como os ácaros (Acari), colêmbolos (Collembola), diplura, protura, enquitreídeos, sínfilos, pseudo-escorpiões e outros animais que se alimentam principalmente de matéria orgânica em decomposição, fungos e outros organismos menores (Parron et al. 2015). Já a macrofauna, é constituída pelas minhocas, formigas, cupins e besouros.

Nos ecossistemas florestais, a fauna edáfica exerce papel relevante, pois a qualidade do solo está fortemente ligada à qualidade do material vegetal decíduo - serapilheira (camada de folhas, galhos e restos orgânicos) que se deposita sobre a sua superfície (Cianciaruso et al. 2006), e aos microrganismos e animais da fauna edáfica que se estabelecem nestes ecossistemas (Brown e Sautter, 2009).

Além disso, a fauna do solo contribui para a melhoria estrutural dos solos florestais, auxiliando na manutenção de processos biológicos através da sucessão (Menta; Remelli, 2020). Vale salientar que, a colonização precoce da fauna do solo pode acelerar a recuperação da arquitetura do solo e processos, melhorando a infiltração de água, ar a ciclagem de nutrientes (Hardegree et al. 2016).

A presença e a diversidade da fauna edáfica estão relacionadas com a saúde do solo e a sustentabilidade dos ecossistemas florestais, no qual, práticas de manejo florestal mantém a integridade da serrapilheira e evitam a compactação do solo, que são fundamentais para preservar a fauna (Silva et al. 2022).

Desde o início dos estágios de sucessão, eles podem estar presentes e desempenhar um papel importante no transporte e decomposição de grandes quantidades de material orgânico (Kihara et al. 2015) e sementes pela paisagem. Sua atividade acumula detritos e sementes ao redor das entradas dos ninhos criando assim microrregiões de alta fertilidade (Pringle et al. 2010; Magalhães et al. 2018), onde a germinação das sementes é facilitada.

Apesar de seu papel fundamental no funcionamento e desenvolvimento dos ecossistemas, a macrofauna edáfica ainda é pouco explorada na restauração ecológica (Araújo et al. 2010; Jouquet et al. 2014) e não comumente incluída na avaliação do sucesso da restauração florestal (Wortley et al. 2013).

No Brasil, possuímos diversos biomas e diversas formações florestais e pouco se conhece sobre a estrutura e a dinâmica das comunidades da fauna do solo e está realidade se contrasta com a enorme velocidade com que extensas áreas de terra vêm sendo transformadas em áreas degradadas. A exploração dos ecossistemas, muitas vezes resultam no declínio da qualidade do solo, o que provoca a redução da biodiversidade edáfica e da vegetação, causando a alteração na manutenção dos ecossistemas terrestres.

Por isso, estudos sobre o conhecimento da fauna edáfica do solo, se fazem necessários, pois podem servir como indicador do subsistema do solo, fornecendo informações sobre o grau de degradação ou recuperação de uma área.

6.5 CICLAGEM DE NUTRIENTES EM ECOSISTEMAS FLORESTAIS

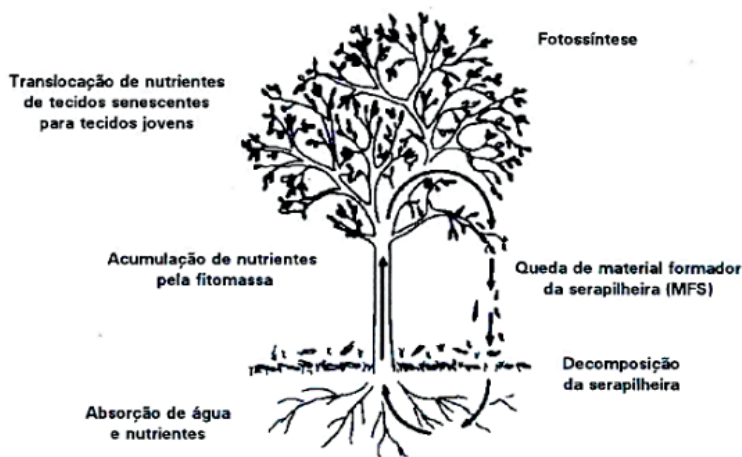
A ciclagem de nutrientes é o processo que possibilita a contínua movimentação dos nutrientes entre organismos vivos e o meio ambiente, onde qualquer intervenção no andamento desse processo pode modificar o sincronismo entre a disponibilidade de nutrientes e a demanda nutricional dos vegetais necessários fazendo com que haja perda de nutrientes (Richlefs, 2003).

A ciclagem de nutrientes em solos florestais ocorre através de um processo complexo que envolve a decomposição da serapilheira e de matéria orgânica, a atividade microbiana e a absorção pelas raízes das plantas. Primeiramente, a serapilheira, composta por folhas, galhos e outros detritos vegetais, cai sobre o solo. Organismos decompositores, como fungos e bactérias, decompõem essa matéria orgânica, liberando nutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio. As plantas absorvem esses nutrientes através de suas raízes, utilizando-os para seu crescimento e desenvolvimento. À medida que as plantas morrem e as raízes morrem e se decompõem, os nutrientes são devolvidos ao solo, reiniciando o ciclo de ciclagem de nutrientes. Este processo contínuo de decomposição e absorção de nutrientes sustenta a fertilidade do solo e o crescimento saudável das plantas em ecossistemas florestais (Figura 6.2).

Em condições naturais, os principais fatores que interferem na ciclagem de nutrientes são o clima, a composição das espécies vegetais, o status sucessional da floresta (tempo após alguma perturbação) e a fertilidade do solo (Vitousek; Sanford, 1986). Em geral, a manutenção destes ecossistemas ocorre através da ciclagem de nutrientes. As perdas de elementos são pequenas. Qualquer intervenção na dinâmica deste processo pode modificar a sincronia entre a disponibilidade de nutrientes oriundos da decomposição dos resíduos vegetais e a demanda nutricional das plantas, gerando, na maioria das vezes, uma maior perda de nutrientes do solo (Myers et al. 1994).

O estudo da ciclagem de nutrientes minerais, via serapilheira é fundamental para o conhecimento da estrutura e funcionamento de ecossistemas florestais (Poggiani; Schumacher, 2000). Segundo Andrade et al. (2008), a serapilheira está diretamente ligada a aspectos da ciclagem de nutrientes como um fator determinante para o desenvolvimento dos vegetais nas florestas localizadas nos trópicos a eficiência de nutrição desses ecossistemas é relativamente baixa relacionado a outros biomas, contudo este processo nutricional depende exclusivamente da biomassa vegetal depositada na camada superficial do solo (Lavelle et al. 1993).

Figura 6.2 - Ciclagem de nutrientes



Fonte: Andrade et al. (1999).

De acordo com Switzer e Nelson (1972), o processo de ciclagem de nutrientes, nos ecossistemas florestais, pode ser caracterizado em três tipos: ciclo geoquímico que se refere a troca (entrada e saída) de elementos minerais entre os diversos ecossistemas; ciclo biogeoquímico que é aquele que se estabelece nas relações entre o solo e a planta e a atmosfera e o ciclo bioquímico relacionam-se com as transferências internas dos elementos dentro dos processos vegetais.

6.6 RELAÇÃO CLIMA-SOLO-PLANTA

De acordo com Pereira (2005) pode-se afirmar que, o clima determina a formação dos grandes tipos zonais de vegetação, enquanto o solo favorece o aparecimento de formações vegetais secundárias. Ao estudar e sistematizar os domínios morfoclimáticos do Brasil, o geógrafo Aziz Nacib Ab'Saber reconheceu tipos secundários de vegetação, inseridos em alguns grandes domínios paisagísticos, os quais ele denominou "enclaves"; assim, alguns capões de matas são enclaves dentro do domínio do cerrado; pequenas matas de araucárias, na Região Sudeste, são enclaves dentro do domínio dos "mares-de-morros" (Mata Atlântica); manchas de cerrado são enclaves dentro da floresta equatorial amazônica; os "brejos" (matas) são enclaves no domínio das caatingas. Os enclaves são comunidades vegetais residuais, remanescentes de antigas formações mais extensas, que foram se extinguindo devido às mudanças paleoclimáticas.

A dinâmica dos ecossistemas florestais depende da inter-relação entre solo, clima e vegetação. O solo e o clima desempenham papéis cruciais na composição, distribuição e saúde das florestas. O solo influencia diretamente o tipo de floresta que pode se estabelecer em uma região, determinado pela sua composição, textura, estrutura, pH e disponibilidade de nutrientes. Solos férteis, bem drenados e ricos em nutrientes favorecem o desenvolvimento de florestas exuberantes e diversificadas. A profundidade do solo e sua capacidade de reter água também afetam a capacidade das plantas de se estabelecerem e crescerem.

O clima, por sua vez, é um fator determinante na distribuição das florestas ao redor do mundo. Florestas tropicais prosperam em climas quentes e úmidos, enquanto as florestas boreais são adaptadas a climas frios e sazonais. A quantidade e sazonalidade da precipitação afetam os padrões de crescimento das árvores e a disponibilidade de água para as plantas.

Existe uma interconexão vital entre o solo e o clima. O clima molda a formação e composição do solo ao longo do tempo, enquanto o solo regula a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, influenciando sua resposta ao clima. Além disso, a cobertura vegetal das florestas pode modular o microclima local, influenciando a temperatura e umidade do ar.

As mudanças climáticas têm impactos significativos nas florestas, alterando padrões de precipitação, temperatura e eventos extremos, afetando a fertilidade e estabilidade do solo. Solos saudáveis podem aumentar a resiliência das florestas às mudanças climáticas, ajudando as plantas a resistirem a estresses ambientais e se adaptarem a novas condições.

Portanto, compreender a relação entre solo, clima e floresta é crucial para o manejo sustentável das florestas e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre esses ecossistemas vitais.

TESTE SEU CONHECIMENTO 😊

- 01) Qual das funções abaixo não é desempenhada pelo solo florestal?
- a) Sustentação das plantas
 - b) Distribuição e infiltração de água
 - c) Produção direta de oxigênio
 - d) Armazenamento e ciclagem de nutrientes
- 02) Quais são os três fatores pedogenéticos específicos que influenciam os solos florestais?
- a) Clima, relevo e ação antrópica
 - b) Resíduos florestais, raízes das árvores e organismos específicos
 - c) Temperatura, umidade e vento
 - d) Rochas, minerais e microrganismos
- 03) A necessidade de adubação em plantios florestais é justificada porque:
- a) O solo libera nutrientes de forma muito rápida
 - b) A decomposição da serapilheira é insuficiente
 - c) A liberação de nutrientes dos minerais ocorre de forma lenta
 - d) O excesso de matéria orgânica dificulta a absorção de nutrientes
- 04) Qual é o principal problema químico enfrentado por plantas em solos muito ácidos ($\text{pH} < 5,5$)?
- a) Deficiência de nitrogênio
 - b) Toxicidade de alumínio
 - c) Excesso de potássio
 - d) Deficiência de fósforo

5) A aplicação de calcário no solo florestal não tem como finalidade:

- a) Reduzir a acidez do solo
- b) Fornecer cálcio e magnésio
- c) Aumentar a concentração de alumínio
- d) Estimular a atividade microbiana

06) O que é a serrapilheira?

- a) Camada de areia e argila na superfície do solo
- b) Conjunto de folhas, galhos e outros detritos orgânicos na superfície do solo
- c) Reservatório de água subterrânea
- d) Camada de rochas meteorizadas

07) Qual fator não influencia na quantidade de serrapilheira acumulada?

- a) Estágio sucessional da floresta
- b) Tipo de floresta
- c) Taxa de decomposição
- d) Temperatura da atmosfera superior (estratosfera)

08) Como a fauna edáfica influencia a qualidade do solo florestal?

- a) Reduzindo a biodiversidade
- b) Diminuindo a infiltração de água
- c) Acelerando a decomposição da matéria orgânica e melhorando a estrutura do solo
- d) Aumentando a compactação do solo

09) Sobre a ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais, é correto afirmar que:

- a) O processo independe da ação dos organismos decompositores
- b) Os nutrientes não retornam ao solo após o ciclo das plantas
- c) A serrapilheira é fundamental no processo de ciclagem
- d) A perda de nutrientes é sempre muito alta em florestas naturais

10) Sobre a relação entre clima, solo e planta, assinale a correta:

- a) O solo determina o clima de uma região
- b) O clima influencia a formação do solo, mas não afeta a vegetação
- c) O solo e o clima juntos determinam os tipos de vegetação que se desenvolvem
- d) As plantas florestais não sofrem influência das condições climáticas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIN, P. de T.; ARAÚJO, W. A. O solo como fator ecológico no desenvolvimento da vegetação no Centro-Oeste do Brasil. *Bol. Geogr.*, Rio de Janeiro, v. 11, n. 117, p. 569-578, 1953.

ANDRADE, R. L. et al. Deposição de Serapilheira em área de Caatinga na RPPN “Fazenda Tamanduá”, Santa Terezinha - PB. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 21, n. 2, p. 223-230, 2008.

ARAÚJO, Ademir Sérgio Ferreira; MONTEIRO, Regina Teresa Rosim. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, v. 23, n. 3, 2007.

ARAÚJO, V.F.P., BANDEIRA, A.G.; VASCONCELLOS, A. Abundance and stratification of soil macroarthropods in a Caatinga Forest in Northeast Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 70, n°. 3, pp. 737-746. 2010.

BALOTA, E. L. Manejo e qualidade biológica do solo. Londrina: Mecnas, 2017. 288 p.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; TEIXEIRA, J. L.; FERNANDES FILHO, E. I. Nutricalc 2.0: Sistema para o cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. *Bosque*, v. 16, p. 129-131, 1995.

BARROS, F. N.; NEVES, L. C. J.; NOVAIS, F. R. Fertilidade de solos, Nutrientes e Produção Florestal. *Visão agrícola* nº4, jul-dez 2005.

BELOTE, A. F. J.; NEVES, E.J.M. Calagem e adubação em espécies florestais plantadas na propriedade rural. Circular técnica, 54. Embrapa Florestas. Colombo, PR, 2001.

BRADY, N. C. Elemento da natureza e propriedade do solo. Ciências do solo. 3a Edição tradução técnica: Igo Fernando Lopsch, Porto Alegre Bookman. p, 186, 2013.

BROWN, G.G.; SAUTTER, K.D. Biodiversity, conservation and sustainable management of soil animals. The XV International Colloquium on Soil Zoology and XII International Colloquium on Apterygota. *Pesq. Agropec. Bras.*, v. 44, p. 1-9, 2009.

CALDEIRA, Marques *et al.* Quantificação de serrapilheira e de nutrientes - Floresta Ombrófila Mista Montana - Paraná. *Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais* 2007; 5: 101-116.

CIANCARUSO, M. V.; PIRES, J. S. R.; DELITTI, W. B. C.; SILVA, E. F. L. P. Produção de serrapilheira e decomposição do material foliar em um cerradão na Estação Ecológica de Jataí, município de Luiz Antônio, SP, Brasil. *Acta Botânica Brasílica*, v. 20, n. 1, p. 49-59, 2006.

COSTA, C. C. A.; CAMACHO, R. G. V.; MACEDO, I. D.; SILVA, P. C. M. Análise comparativa da produção de serrapilheira em fragmentos arbóreos e arbustivos em área de caatinga na Flona de Açu - RN. *Revista Árvore*, v. 2, n. 34, p. 259-265, 2010.

DALMOLIN, Â.C. *et al.* Aporte de material vegetal sobre o solo em uma floresta semidecídua ao norte do estado de Mato Grosso. In: I SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA. Anais... 2009, 6p.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable environment, v. 35, p. 1-21, 1994.

FERREIRA, L.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N. & VITORINO, A.C.T. Tipos de dispersantes, forma de agitação e suas relações com a erodibilidade de solos com altos teores de óxidos de ferro. *Ci. Agrotec*, 26:342-353, 2002.

FRANCHINI, J. C.; MEDA, A. R.; CASSIOLATO, M. E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. *Scientia Agrícola Piracicaba*, SP V 58, N.2, 2001.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F. Sistema de produção de melão. Embrapa Seminário. Sistema de Produção, 5. 2010. Disponível em: <http://www.cpatia.embrapa.br:8080/sistema_producao/spmelao/manejo_do_solo.html>. Acesso em 12 dez de 2023.

HARDEGREE, S.P.; JONES, T.A.; ROUNDY, B.A.; SHAW, N.L.; MONACO, T.A. Assessment of range planting as a conservation practice. ***Rangeland Ecology & Management***. Vol. 69. pag 237–247. 2016.

HERNÁNDEZ, J. M. L. Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios de estado de Nuevo León, México. Tese (Doutorado em manejo de Recursos Naturais) Universidad de Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, 93 p., 2014.

JOUQUET, P., BLANCHART, E.; CAPOWIEZ, Y. Utilization of earthworms and termites for the restoration of ecosystem functioning. ***Applied Soil Ecology***, vol. 73, pp. 34-40.2014.

KARA, Ö.; BOLAT, I. Soil microbial biomass C and N changes in relation to forest conversion in the northwestern Turkey. *Land Degradation & Development*, Chichester, v. 19, n. 4, p. 421–428, 2008.

LAVELLE, P.; BIGNELL, D.; LEPAGE, M.; WOLTERS, V.; ROGER, P.; INESON, P.; HEAL, O. W.; GHILLION, S. Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, Paris, v. 33, p. 159–193, 1997.

MARTINS, S. V. Recuperação de áreas degradadas: ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração. Viçosa: Aprenda Fácil, 2009. 270p.

MENTA, C.; REMELLI, S. Soil health and arthropods: from complex system to worthwhile investigation. *Insects* 11:54. 2020.

MYERS, R.J.K.; PALM, C.A.; CUEVAS, E.; GUNATILEKE, I.U.N.; BROSSARD, M. The synchronisation of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. In: WOOMER, P.L.; SWIFT, P.L., ed. *The biological management of tropical soil fertility*. New York: J. Wiley, 1994. p.81–116.

NEVES, J. C. L. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. 2000. 192 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goitacazes, 2000.

NEVES, E. J. M.; MARTINS, E. G.; REISSMANN, C. B. Deposição de serapilheira e de nutrientes de duas espécies da Amazônia. *Boletim de Pesquisa Florestal*, v. 7, n. 43, p. 4760, 2001.

OLLINGER, S. V.; SMITH, M. L.; MARTIN, M. E.; HALLET, R. A.; GOODALE, C. L.; ABER, J. D. Regional variation in foliar chemistry and N cycling among forests of diverse history and composition. *Ecology*, Washington, v. 83, n. 2, p. 339–355, 2002.

O'CONNELL, Sankaran. Organic matter accretion, decomposition and mineralisation. In: Nambiar EKS, Brown AG, editors. *Management of soil, nutrients and water in tropical plantations forests*. Canberra: ACIAR Australia/CSIRO; 1997. p. 443–480

PÁDUA, J. A. Um sopro de destruição: Política e crítica ambiental no Brasil escravista (1786–1888). Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 318 p., 2002.

PEREIRA, B. A. Vegetação como elemento do meio físico. **Revista Nucleus**, v.3, n.1, abr. 2005.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Ciclagem de nutrientes em florestas nativas. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.). *Nutrição e fertilização florestal*. Piracicaba: IPEF, 2000. 427p.

ROVEDDER, M. P. A.; SUZUKI, S. A. E. L.; DALMOLI, D. S. R.; REICHERT, M. J.; SCHENATO, B. R. Compreensão e Aplicabilidade do Conceito de Solo Florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 3, p. 517-528, jul.-set., 2013

ROSSI, M.; MATTOS, A. F.I.; COELHO, M.R.; MENK, F.R.J.; ROCHA, T. F.; PFEIFER, M.R.; deMARIA, C. I. Relação solos/vegetação em área natural no parque estadual de Porto Ferreira, São Paulo. **Rev. Inst. Flor.**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 45-61, jun. 2005.

SILVA, M. S. C. da. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais em Paraty, RJ. 2006,54f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, S. I. A. da; SOUZA, T.; LUCENA, E. O. de; LAURINDO, L. K.; SANTOS, D. Influência de sistemas de cultivo sobre a comunidade da fauna edáfica no nordeste do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 829–855, 2022. doi:10.5902/1980509855320

SOUZA. R. M. *Mapeamento Social dos Faxinais no Paraná*. Instituto Equipe de Educadores Populares - IEEP, Articulação Puxirão dos Povos Faxinalenses. 2007, 59 p.

SWITZER, G. L.; NELSON, L. E. Nutrient accumulation and cycling in Loblolly Pine (*Pinus taeda*) plantation ecosystems: The first 20 years. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 36, p. 143-147, 1972.

TSUI, C. C.; CHEN, Z. S.; HSIEH, C. F. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. *Geoderma*, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p.131–142, 2004.

VITOUSEK, P.M; SANFORD JR., R.L. Nutrient cycling in most tropical forest. *Annual Review Ecology Science*, v. 17, p. 137- 167, 1986.

XAVIER, F. A. da S. Solo: definição e importância. In: BORGES, A. L. (Ed.). *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Cap. 1. p15-25.

ZAÚ, A.S. Fragmentação de Mata Atlântica: Aspectos Teóricos. *Floresta e Ambiente*, 5 (1): 60-170, 1998.

WILDE, S. A. **Forest soils**: their properties and relation to silviculture. New York: The Ronald Press Company, 1958. 536 p.

WORTLEY, L., HERO, J.M. and HOWES, M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. **Restoration Ecology**, vol. 21, no. 5, pp. 537-543. 2013.



CAPÍTULO 7

POLUIÇÃO DO SOLO

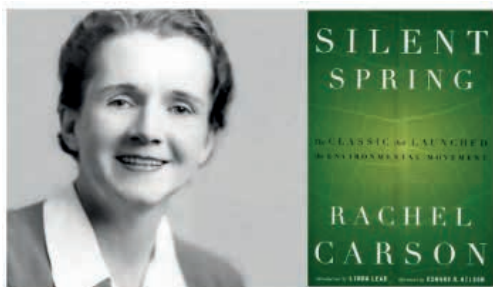
Beatriz Rodrigues Bagnolin Muniz

Natacha Madruga Farias

7.1 O DESPERTAR DA CONSCIÊNCIA AMBIENTAL E O DESENVOLVIMENTO DAS NORMATIVAS AMBIENTAIS

O ano de 1962 marcou o despertar da consciência ambiental com a publicação do livro *Primavera Silenciosa*, escrito por Rachel Carson (Figura 7.1). A obra iniciou uma profunda transformação na relação entre os seres humanos e o meio ambiente, sendo considerada um marco histórico no movimento ambientalista. A repercussão levou à proibição da produção doméstica do diclorodifeniltricloroetano (DDT) e fomentou a criação de políticas de controle ambiental (Carson, 2010; UNEP, 2020).

Figura 7.1 – Rachel Carson e obra intitulada *Primavera silenciosa*.



Fonte: American Chemical Society (2012).

O primeiro encontro internacional voltado exclusivamente às questões ambientais ocorreu em 1972, na Conferência das Nações Unidas em Estocolmo, que resultou na criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). A partir desse evento, diversos acordos internacionais foram estabelecidos com foco na proteção dos oceanos, conservação da fauna e melhoria da qualidade do ar.

Em 1980, o PNUMA publicou a Estratégia de Conservação Mundial, documento fundamental que definiu o conceito de desenvolvimento sustentável e delineou a agenda global nessa área. Em 1982, instituiu-se o primeiro Programa de Montevideu, estabelecendo prioridades para a legislação ambiental global. Já em 1987, o Protocolo de Montreal foi adotado por 197 países para controlar substâncias que destroem a camada de ozônio, sendo o único protocolo adotado de forma unânime até os dias atuais.

Em 1988, o PNUMA e a Organização Meteorológica Mundial criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que passou a fornecer subsídios científicos para a formulação de políticas climáticas. No final da década de 1980, mais precisamente em 1989, 183 países adotaram a Convenção da Basileia, que regulamenta o transporte e o descarte de resíduos perigosos.

A década de 1990 também foi marcada por avanços significativos. Em 1991, foi criado o Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), com o objetivo de financiar projetos ambientais. Em 1992, em um curto intervalo de três meses, ocorreram a Convenção sobre os Recursos Hídricos e a Cúpula da Terra, realizada no Rio de Janeiro. Nesta última, destacaram-se a criação da Agenda 21 e de outros importantes compromissos ambientais.

Em 1996, passou a vigorar a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, sendo o único acordo internacional que vincula juridicamente o desenvolvimento sustentável à gestão da terra. Em 1998, a Convenção de Roterdã estabeleceu diretrizes para a regulamentação da importação de pesticidas e produtos químicos perigosos. Apenas em 1999, com o Pacto Global das Nações Unidas, os países-membros começaram a incentivar diretamente o setor privado na adoção de práticas sustentáveis e socialmente responsáveis.

Com o avanço tecnológico e o crescimento populacional, os acordos dos anos 2000 passaram a atender necessidades mais específicas. Destacam-se: o Protocolo de Cartagena sobre biossegurança (2000), a Convenção de Estocolmo sobre poluentes orgânicos persistentes (2001), e o programa UN-REDD (2008), voltado à redução do desmatamento, degradação florestal e emissões de gases do efeito estufa, com mecanismos de crédito de carbono.

Além dos protocolos, diversas conferências se tornaram marcos importantes, como a de Copenhague (2009), que estabeleceu a meta de limitar o aumento da temperatura global a 2°C, a RIO+20 (2012), com foco no desenvolvimento sustentável, e a Convenção de Minamata (2017), voltada ao controle e redução do uso e emissões de mercúrio.

No Brasil, a primeira legislação ambiental foi instituída em 1981 com a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981). Com o tempo, e diante da pressão de organizações ambientais e da sociedade civil, novas leis foram criadas para consolidar um sistema mais completo de proteção ambiental.

7.2 ACIDENTES AMBIENTAIS

Apesar dos avanços legais e institucionais, muitas normas ambientais só foram implementadas após uma série de desastres ambientais de grandes proporções. Entre os principais, destacam-se: a Doença de Minamata, a nuvem de dioxina em Seveso, o acidente na usina de Three Mile Island, o vazamento em Bhopal, a explosão de Chernobyl e o caso do Césio-137 em Goiânia (Gonçalves, 2017).

No ano de 1954 na cidade japonesa de Minamata localizada ao sul da Província de Kumamoto, alguns distúrbios e diminuição na população foram observados na fauna local. Dois anos depois, sintomas como convulsões e perda das funções motoras, se manifestaram na população local. Estudos revelaram que os danos neurológicos estavam ligados à contaminação por derramamento de efluentes com elementos-traço, em proeminência o mercúrio, pela Corporação Chisso que produzia fertilizantes e produtos petroquímicos. Por meio do derramamento, o metilmercúrio foi introduzido na cadeia alimentar, causando o envenenamento pela ingestão de animais contaminados.

Em 1976, uma explosão de um reator na fábrica química Icmesa, propriedade do grupo suíço Roche, localizada na cidade de Seveso, na Itália, acarretou a emissão de dioxina para a atmosfera que se manteve concentrada sobre a cidade. Tal episódio ficou conhecido como nuvem de dioxina. A deposição causou a contaminação de 1.800 hectares de terra. As primeiras consequências foram observadas na fauna que ia a óbito de forma gradativa. Seguidamente a população começou a apresentar alguns sintomas como, lesões cutâneas, náuseas e visão turva. Após a interdição da empresa, o solo contaminado foi lacrado em grandes estruturas de concreto e o restante do material armazenado em galões para tratamento.

O pior acidente nuclear dos Estados Unidos ocorreu na usina de *Three mile island* na Pensilvânia em 1979, o reator TMI-2 apresentou problemas mecânicos devido a um derretimento parcial do núcleo devido ao desligamento do circuito responsável pelo abastecimento de água destinada à refrigeração do gerador de vapor, sendo assim acionou-se o bombeamento de água por meio do circuito de resfriamento de emergência, porém, em decorrência de uma falha operacional, as válvulas que controlavam a passagem para o gerador de vapor ficaram bloqueadas por alguns instantes. Consequentemente, a água contaminada inundou o prédio de contenção, liberando gases com níveis elevados de radiação, xenônio e criptônio, para a atmosfera. A população foi retirada somente dois dias após o acidente, não sem a constatação de danos à saúde.

O maior desastre químico da história ocorreu em 1984, na cidade de Bhopal, na Índia, devido ao vazamento de aproximadamente 40 toneladas de gases letais, entre eles o metil isocianato (C_2H_3NO), na planta industrial da Union Carbide

Corporation, empresa fabricante de agrotóxicos. O vazamento teve origem no aumento descontrolado da pressão dentro de um tanque de armazenamento de isocianato de metila, mantido em estado líquido. O sistema de emergência, projetado para conduzir o composto a uma solução neutralizadora antes de sua liberação na atmosfera, não foi devidamente acionado. Apesar do aumento contínuo da pressão, os operadores evacuaram a instalação sem ativar as mangueiras de resfriamento do tanque. Como resultado, por meio de uma válvula defeituosa, o isocianato de metila foi liberado e transformado em estado gasoso, formando uma nuvem tóxica sobre a região. A exposição ao gás causou a morte imediata de mais de 2.000 pessoas, enquanto cerca de 50.000 sobreviventes sofreram graves lesões nos olhos e nos pulmões. A empresa responsável abandonou o local, que até hoje apresenta impactos ambientais e sociais significativos.

Em 1986, em Chernobyl, Ucrânia, acontecia o maior acidente nuclear da história, superando em dezenas de vezes os níveis de radiação das bombas de Hiroshima e Nagasaki. A explosão de um dos quatro reatores da usina da Central Nuclear de V. I. Lenin foi oriunda de uma sequência de falhas humanas, desativação do mecanismo de desligamento automático do reator e o desligamento de quatro das oito bombas de água que o refrigeravam, durante um teste para quantificar o tempo que as turbinas eram capazes de girar após uma queda repentina de energia. Imediatamente, 32 pessoas morreram e outros milhares perderam a vida nos anos seguintes. A nuvem nuclear atingiu a Europa e contaminou quilômetros de florestas.

O Brasil também foi cenário de um grave acidente radiológico em 1987, na cidade de Goiânia, Goiás. O incidente ocorreu quando dois catadores de materiais recicláveis recolheram um aparelho de radioterapia abandonado nas instalações desativadas do Instituto Goiano de Radioterapia. Levado a um ferro-velho para ser desmontado, o equipamento, composto por aço e chumbo, chamou a atenção dos trabalhadores, especialmente por conter uma cápsula com cloreto de cério-137 em forma de pó, que emitia um brilho azulado. Fascinado pelo brilho e acreditando tratar-se de algo valioso, um dos catadores compartilhou o material com familiares, amigos e vizinhos, sem ter consciência do risco radioativo. A manipulação e o deslocamento do cério-137 resultaram na contaminação de pessoas, da água, do solo e do ar, culminando na morte de pelo menos quatro pessoas e deixando dezenas com sequelas graves.

Ao relembrar alguns dos acidentes ambientais mais relevantes, compreende-se que muitos deles poderiam ter sido evitados ou, ao menos, ter seus impactos significativamente minimizados, caso existissem diretrizes e normativas adequadas para regulamentar a instalação e a operação das atividades. Tais normas deveriam contemplar tanto os procedimentos em condições habituais quanto as medidas preventivas e corretivas em cenários excepcionais.

Porém, após essa percepção, o questionamento que fica é: “Como, após a criação de diversas diretrizes de controle ambiental, ainda ocorrem esses acidentes?” Pois bem, apesar da criação dos instrumentos legais que asseguram a qualidade ambiental e a saúde e o bem-estar da população, sendo o rigor embasado no grau de periculosidade de cada atividade exercida, a fiscalização ainda é falha. Essa fragilidade está diretamente relacionada à insuficiência de profissionais capacitados para atender à crescente demanda por análises de projetos e processos de licenciamento. Como consequência, a atuação fiscalizatória acaba sendo, muitas vezes, reativa, concentrando-se nos casos em que há denúncias formalizadas, em vez de exercer um controle preventivo e sistemático.

7.3 POLUIÇÃO E CONTAMINAÇÃO

O termo Poluição refere-se a uma contaminação com liberação de substâncias nocivas para o meio ambiente, causando danos à saúde e ao bem-estar da população e de todo ecossistema de entorno. A distinção entre poluição e contaminação é importante para entender os impactos ambientais e a presença de substâncias estranhas em um meio. Nem toda contaminação é poluição, pois a contaminação refere-se apenas à presença de substâncias não naturais ao ambiente, enquanto a poluição implica dano ou prejuízo ao meio ou à saúde (Schweitzer; Noblet, 2018; Franjic, 2021).

Diante desse contexto, surge a seguinte questão: como determinar se uma determinada área está contaminada? A resposta envolve a comparação dos resultados obtidos por meio do diagnóstico ambiental com os Valores de Referência de Qualidade do Solo (VRQ). Esses valores correspondem aos teores naturais de elementos presentes no solo, determinados com base em suas características geológicas, geomorfológicas e pedológicas (Suppi et al. 2021). Logo, mesmo se a quantificação de um determinado elemento-traço for elevada a contaminação só pode ser confirmada após conferência com o valor de referência definido pelo órgão competente do elemento em questão. Além do VRQ as legislações apresentam a referência para Valor de orientação (VO) e Valor de Prevenção (VP). Valor de Prevenção (VP) corresponde à concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais de acordo com o art. 3º da Resolução Conama 420, de 28 de dezembro de 2009. Já o valor de Investigação (VI) trata-se da concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Para o estado de Santa Catarina, os valores orientadores de qualidade dos solos e águas subterrâneas são estabelecidos pela Portaria nº 45/2021 – IMA/SC, de 19 de março de 2021, conforme a Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Lista de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas.

Substâncias	CAS nº	Solo (mg.kg ⁻¹ de peso seco) (1)					Água Subterrânea (µg.L ⁻¹)
		Referência de qualidade	Prevenção	Investigação			Investigação
				Agrícola APMáx	Residencial	Industrial	
Inorgânicos							
Bário	7440-39-3	75,76	150	300	500	750	700*
Cádmio	7440-43-9	0,11	1,3	3	8	20	5*
Chumbo	7439-92-1	16,08	72	180	300	900	10*
Cobalto	7440-48-4	22,58***	25	35	65	90	70
Cobalto	7440-48-4	54,28****	25	35	65	90	70
Cobre	7440-50-8	93,84***	60	200	400	600	2.000*
Cobre	7440-50-8	146,92****	60	200	400	600	2.000*
Cromo	7440-47-3	47,68	75	150	300	400	50*
Níquel	7440-02-0	18,3	30	70	100	130	20
Zinco	7440-66-6	55,6***	300	450	1.000	2.000	1.050**
Zinco	7440-66-6	78,1****	300	450	1.000	2.000	1.050**
Hidrocarbonetos aromáticos voláteis							
Benzeno	71-43-2	na	0,03	0,06	0,08	0,15	5*
Estireno	100-42-5	na	0,2	15	35	80	20*
Etilbenzeno	100-41-4	na	6,2	35	40	95	300**
Tolueno	108-88-3	na	0,14	30	30	75	700**
Xilenos	1330-20-7	na	0,13	25	30	70	500**
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos							
Antraceno	07/12/20	na	0,039	-	-	-	-
Benzo(a) antraceno	56-55-3	na	0,025	9	20	65	1,75
Benzo(k) fluoranteno	207-06-9	na	0,38	-	-	-	-
Benzo(g,h,i) perileno	191-24-2	na	0,57	-	-	-	-
Benzo(a) pireno	50-32-8	na	0,052	0,4	1,5	3,5	0,7*
Criseño	218-01-9	na	8,1	-	-	-	-
Dibenzo(a,h) antraceno	53-70-3	na	0,08	0,15	0,6	1,3	0,18

Substâncias	CAS nº	Solo (mg.kg ⁻¹ de peso seco) (1)					Água Subterrânea (µg.L ⁻¹)
		Referência de qualidade	Investigação				Investigação
			Prevenção	Agrícola PMax	Residencial	Industrial	
Fenóis não clorados							
Cresóis	-	na	0,16	6	14	19	175
Fenol	108-95-2	na	0,20	5	10	15	140
Ésteres ftálicos							
Dietilexil ftalato (DEHP)	117-81-7	na	0,6	1,2	4	10	8
Dimetil ftalato	131-11-3	na	0,25	0,5	1,6	3	14
Di-n-butil ftalato	84-74-2	na	0,7	-	-	-	-
Pesticidas organoclorados							
Aldrin	309-00-2	na	0,015	0,003	0,01	0,03	(d)*
Dieldrin	60-57-1	na	0,043	0,2	0,6	1,3	(d)*
Endrin	72-20-8	na	0,001	0,4	1,5	2,5	0,6*
DDT	50-29-3	na	0,010	0,55	2	5	(c)*
DDD	72-54-8	na	0,013	0,8	3	7	(c)*
DDE	72-55-9	na	0,021	0,3	1	3	(c)*
HCH beta	319-85-7	na	0,011	0,03	0,1	5	0,07
HCH – gama (Lindano)	58-89-9	na	0,001	0,02	0,07	1,5	2*
PCBs							
TOTAL	-	na	0,0003 (3)	0,01	0,03	0,12	3,5

(1) – Para comparação com valores orientadores, utilizar as recomendações dos métodos 3050b (exceto para o elemento mercúrio) ou 3051 da USEPA–SW–846 ou outro procedimento equivalente, para digestão ácida de amostras de solos na determinação das substâncias inorgânicas por técnicas espectrométricas.

Na - não se aplica para substâncias orgânicas.

(a) somatória para triclorobenzenos = 20 µg.L⁻¹.

(b) somatória para 1,2 dicloroetenos; = 50 µg.L⁻¹.

(c) somatória para DDT-DDD-DDE = 2 µg.L⁻¹.

(d) somatória para Aldrin e Dieldrin = 0,03 µg.L⁻¹.

* Padrões de potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde definidos na Portaria no 518/2004 do Ministério da Saúde (Tabela 3). ** Valores calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo desta Resolução. Diferem-se dos padrões de aceitação para consumo humano definidos na Portaria no 518/2004 do Ministério da Saúde (Tabela 5) e dos valores máximos permitidos para consumo humano definidos no Anexo I da Resolução CONAMA no 396/2008.

*** VRQ aplicável a solos com teores de argila inferiores a 590 g.kg⁻¹ (59%).

**** VRQ aplicável a solos com teores de argila iguais ou superiores a 590 g.kg⁻¹.

Fonte: Adaptado de: Anexo II da Resolução Conama 420 de 28 de dezembro de 2009.

7.4 FONTES DE CONTAMINAÇÃO

Antes de entrarmos mais especificamente na poluição do solo, é de suma importância termos ciência de que nenhum tipo de contaminação necessariamente ficará retida exclusivamente no solo, na água ou no ar, pois tais compartimentos encontram-se interligados.

A poluição atmosférica pode atingir o solo e a água por meio da dissolução de partículas em estado líquido ou gasoso em suspensão, como o dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, por meio da dissolução com as partículas de água durante a precipitação, processo conhecido como chuva ácida (Prakash; Agrawal; Agrawal, 2022).

Processos de erosão, escoamento superficial e percolação deslocam contaminantes do solo para a água. A transferência através de processos erosivos ocorre devido à desagregação e sedimentação de detritos de solo contendo elementos contaminantes adsorvidos nas frações orgânicas e minerais para cotas mais baixas, atingindo ecossistemas léticos e lóticos. A deposição de rejeitos sob o solo sem a aplicação de técnicas de revestimento, como impermeabilização e cobertura, propiciará a infiltração e percolação de compostos contaminantes no perfil do solo, podendo atingir águas subterrâneas pela interação com o lençol freático (Pimental, 2007).

O deslocamento de compostos do solo para a atmosfera pode ocorrer por volatilização. Um exemplo clássico é a volatilização da amônia oriunda de um fenômeno denominado hidrólise enzimática, onde ocorre a formação de amônio pela enzima urease. Dependendo das condições edafoclimáticas, parte do amônio NH_4^+ é transformado em NH_3 volatilizando para a atmosfera (Sigurdarson; Svane; Karring, 2018; Yahya et al. 2021).

Sendo assim, as principais fontes de contaminação dos compartimentos ambientais, solo, água e ar, são as áreas de disposição de resíduos, mineração e beneficiamento de minérios, atividades industriais e atividades agropecuárias.

Uma das grandes preocupações da poluição proveniente de áreas de disposição de resíduos, como aterros sanitários, é o vazamento do chorume. O chorume é uma substância líquida que contém elevadas concentrações de compostos orgânicos e inorgânicos e elementos-traço (Kemerich et al. 2014).

A contaminação do solo devido ao processo de mineração para extração do ouro, caulim e carvão mineral está vinculada com a geração de rejeitos decorrentes dessa atividade, considerando que eles contribuem na elevação dos teores de elementos-traço no solo (Oliveira-Filho; Muniz, 2008).

A contaminação do solo proporcionada pelas atividades industriais certamente é a mais diversificada, tendo como base os inúmeros segmentos industriais, farmacêutico, metalúrgico, químico, dentre outros, que ao longo do seu processo produtivo geram gases, efluentes e resíduos, contendo contaminantes de orgânicos e inorgânicos que em algum momento, seja por dispersão de partículas ou devido a vazamentos, podem atingir o solo.

Os maiores impactos ambientais causados pelas agriculturas estão relacionados ao uso de defensivos agrícolas, sendo os herbicidas os mais utilizados, seguidos pelos inseticidas e fungicidas. Porém, apesar de os herbicidas serem mais utilizados, geralmente possuem toxicidade inferior quando comparados aos inseticidas (Barboza et al. 2018).

7.5 COMPORTAMENTO DOS CONTAMINANTES NO SOLO

Os poluentes dividem-se em primários e secundários. Poluentes primários são as substâncias que, quando inseridas no ambiente, causam impactos sem sofrer qualquer tipo de alteração, ou seja, na forma que foram introduzidas. Por outro lado, os poluentes secundários consistem em substâncias que reagem formando outros produtos, os quais são mais impactantes ao ambiente do que a substância inserida inicialmente (Kumari, 2024).

Os poluentes também podem ser orgânicos, compostos principalmente de carbono, hidrogênio e oxigênio, ou inorgânicos, substâncias inanimadas ou inertes. Contrariamente aos compostos orgânicos, as moléculas de contaminantes inorgânicos normalmente não são degradadas, porém com a modificação de algumas propriedades, como exemplo a valência, por meio de processos como bioacumulação, oxidação, redução, complexação e fitorremediação é possível imobilizar, mobilizar ou transformar os contaminantes inorgânicos (Alguacil; Merino, 1998).

Dentre os poluentes orgânicos, encontram-se os hidrocarbonetos oriundos do petróleo, pesticidas e corantes. Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, conhecidos popularmente como HPAs fazem parte de uma família de compostos caracterizada por deter no mínimo dois anéis aromáticos condensados. Tanto os próprios HPAs quanto seus derivados nitrados e oxigenados são considerados agentes carcinogênicos e teratogênicos (Netto et al. 2000; Argumedo-Delira et al. 2009).

Os pesticidas podem ser divididos em sete classes: organoclorados, organofosforados, carbamatos, piretróides, aminas, anilinas e compostos heterocíclicos azotos, sendo as classes mais comuns os organoclorados e organofosforados. Pesticidas organoclorados são constituídos por moléculas de alto peso molecular, contendo halogênios e / ou anéis aromáticos condensados, logo, comumente são acumulados, se mantendo no ambiente por vários anos. Por possuírem uma baixa

persistência ambiental e elevada eficácia, os organofosforados são usados como substitutos dos organoclorados, são compostos que, além do fósforo, detêm ao menos um átomo de carbono (Flores et al. 2004; Barboza et al. 2018).

Os corantes sintéticos são substâncias orgânicas complexas constituídas por vários anéis aromáticos recalcitrantes, além disso, grande parte dos corantes ainda apresenta os grupos azo funcionais que lhes conferem elevada estabilidade, o que dificulta sua remoção (Reck; Paixão, 2016).

Já com relação aos poluentes inorgânicos, destacam-se os metais. O bário, cálcio, ferro, zinco, cobre, níquel, magnésio, arsênio, chumbo, cádmio, mercúrio, alumínio, titânio, estanho, cromo, cobalto, são os elementos traços mais comuns, caracterizam-se por possuírem elevada massa atômica e específica além de um elevado número atômico, sendo mais tóxicos em sua forma catiônica e associados a cadeias carbônicas, sendo extremamente persistentes no solo (Paye; Mello; Melo, 2012).

Quando compostos contaminantes são dispostos sobre o solo, inicia-se o processo de infiltração, ou seja, sua passagem da superfície para o subsolo. Já o deslocamento ao longo das diferentes camadas que compõem o perfil do solo denomina-se percolação.

A percolação de contaminantes é extremamente influenciada pela textura do solo, considerando sua relação direta com outras propriedades como a porosidade. Solos compostos predominantemente por partículas maiores, arenosos, são mais porosos do que solos com predomínio de partículas finas, argilosos, porém o tamanho dos poros é maior quando comparado a solos argilosos. Nesse contexto, a percolação de contaminantes ocorrerá de forma mais rápida ao longo do perfil, podendo facilmente atingir o lençol freático, tornando o processo de remediação mais dispendioso. Por isso, a implementação de aterros sanitários ocorre em locais de solos argilosos, pois além da segurança propiciada pela impermeabilização com mantas geotêxtil, em casos de vazamentos, a percolação se dará de forma mais lenta, possibilitando a tomada de medidas para a remediação, eliminando ou reduzindo impactos ambientais.

A fração argila é composta por diversos minerais, dentre eles argilominerais que podem ser 1:1 ou 2:1 (como já abordado nos capítulos anteriores). O tipo de argilominerais predominantes no solo também influencia na dinâmica dos compostos contaminantes, considerando que influem na sua disponibilidade nas diferentes fases, adsorvidos na fase sólida ou na solução do solo. Possuem cargas negativas nas camadas expostas, atraindo moléculas com cargas positivas, como, por exemplo, os metais. A elevada área superficial específica (ASE) dos argilominerais 2:1, lhes confere uma maior capacidade de troca catiônica (CTC) fazendo com que mantenham uma maior quantidade de contaminantes adsorvidos na fase sólida do

solo, evitando que permaneçam na solução do solo, estando sujeitos a lixiviação ou absorção pelos produtores autotróficos fotossintetizantes, inserindo-os no primeiro nível trófico da cadeia alimentar e posteriormente nos demais níveis. Ressalta-se que a adsorção na fase sólida não se refere exclusivamente aos contaminantes ligados aos sólidos inorgânicos, como os minerais de argila, óxidos e hidróxidos, mas também a sólidos orgânicos.

Percebe-se que a disponibilidade das cargas elétricas é imprescindível para a adsorção de contaminantes no solo, sendo o pH e a matéria orgânica os fatores mais relevantes na disponibilidade dos sítios de ligação. A elevação do pH faz com que os íons H^+ se dissociem dos grupos funcionais presentes nas superfícies externas dos componentes sólidos juntamente com as cargas liberadas devido a precipitação do alumínio. Essa técnica é muito utilizada em solos das regiões tropicais devido ao elevado grau de intemperismo que favorece a dominância de argilominerais como a caulinita. Já o aumento das cargas elétricas negativas pela incorporação de matéria orgânica no solo acontece pelo elevado número de radicais carboxílicos e hidroxílicos que dispõem de valores muito variados para as constantes de dissociação, gerando dessa forma cargas elétricas em uma ampla faixa de pH (Ernani, 2016).

A adsorção pode ser do tipo específica, onde os íons ou moléculas se ligam diretamente aos grupos funcionais existentes nas superfícies sólidas sem considerar a atração oriunda por cargas opostas, sendo esse tipo de ligação muito comum em íons metálicos, como cobre e zinco, em função dos íons metálicos/metais de transição serem capazes de fazer uma segunda valência e ficarem ligados na matéria orgânica de forma bidentada, aumentando a força de ligação, ligação covalente (Hadlich; Ucha, 2013). Por esse fato, muitos resíduos orgânicos, comumente denominados como biocarvão ou biochar, vêm sendo estudados para remediação de áreas contaminadas, sendo oriundos de resíduos tanto vegetais como animais, sendo normalmente associados a mais um mecanismo como microrganismos ou bagaços visando potencializar o processo de remediação. Por outro lado, a adsorção não específica caracteriza-se por mecanismos de ligação eletrostática, sendo assim a ligação dos íons ou moléculas, nesse caso sempre hidratados, se dará apenas em superfícies externas com carga oposta (Linhares et al. 2009).

7.6 REMEDIAÇÃO DE POLUENTES NO SOLO

A remediação de solos contaminados pode ser realizada por meio de métodos químicos, físicos e biológicos. Atualmente, a utilização de organismos se destaca em função do seu custo e benefício, tendo em vista o elevado custo, baixa eficiência e geração de subprodutos, os quais necessitam de tratamento adicional, oriundos da aplicação dos métodos químicos e físicos (Andreazza et al. 2019).

7.6.1 biorremediação

A utilização de microrganismos, como fungos, bactérias, fungos, algas ou suas enzimas, veem se demonstrando como uma alternativa viável para a remediação e mitigação de áreas contaminadas com moléculas orgânicas recalcitrantes e elementos-traço, considerando que a atividade microbiana mineraliza completamente ou transforma os contaminantes em uma forma menos tóxica e ambientalmente aceitável ou armazenam, fixando, impedindo a sua mobilidade.

Os compostos orgânicos de degradação complexa, hidrofóbicos e bioacumulativos são denominados como recalcitrantes ou persistentes, possuem elevada estabilidade química, fotoquímica e uma taxa de biodegradação extremamente lenta. A classe dos orgânicos recalcitrantes é constituída por uma ampla variedade de compostos orgânicos halogenados, agroquímicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, dioxinas e furanos e os estrogênios ambientais (UNESP). A procedência dessas moléculas pode ser natural, sintetizadas pelo metabolismo biológico, ou sintéticas por meio de tecnologias industriais, sendo estas denominadas como xenobióticas (Gaylarde; Bellinaso; Manfio, 2005).

Pode ser realizada *ex situ* através das técnicas *landfarming*, biopilhas e tratamento em biorreatores, ou *in situ* com a inserção de nutrientes para potencializar a atividade dos microrganismos, bioestimulação, assim como a inserção de microrganismos estranhos, alóctones (Francisco; Queiroz, 2018).

Dentre as técnicas *ex situ* tem-se o método *landfarming* o qual baseia-se na retirada do solo contaminado e posterior disposição em camadas sobre um leito de solo devidamente impermeabilizado por mantas sintéticas, sendo a massa de solo contaminado e solo subjacente revolvidos periodicamente com auxílio de grade de disco, monitorando a umidade dessa mistura, promovendo uma proliferação natural de microrganismos responsáveis por sua estabilização por meio da digestão aeróbia. As dificuldades para a implementação do *lanfarming* estão relacionadas a questões de espaço, controle de condições ideais para o desenvolvimento da população de microrganismos, aumentando o tempo de degradação nos casos de compostos recalcitrantes (Maila; Cloete, 2004).

A metodologia de biopilhas, biocélulas, biomontes ou pilhas de compostagem fundamenta-se em reunir o solo contaminado em pilhas, estimulando a atividade microbiana aeróbia, inclusive aquela já presente no solo contaminado, pela adição de nutrientes, oxigênio e surfactantes, ou ainda pode ser bioampliada com a inoculação de consórcios microbianos enriquecidos, tornando o sistema de biopilha confiável para redução das moléculas contaminantes pela biodegradação oriunda da respiração microbiana (Bisognin et al. 2018). O método possui desvantagens similares ao método *landfarms*, porém demanda de uma área menor para a implementação.

Os biorreatores dividem-se em dois tipos reatores de fase sólida, reatores horizontais, e reatores de fase semi-sólida, reatores verticais, também denominados como reatores de lama. O mais indicado para a remediação de solos contaminados sem remoção prévia das frações finas são os reatores de fase sólida, enquanto os biorreatores de fase semi-sólida são mais apropriados para solos com predominância das frações finas em suspensão pós lavagem, respectivamente (Eibl; Eibl, 2007).

Quando comparados às técnicas anteriores, *landfarming* e biopilhas, os biorreatores se sobressaem devido ao controle de emissões atmosféricas, águas residuais, condições operacionais (pH, temperatura, teor de umidade, aeração), homogeneização adequada, monitoramento da degradação das moléculas poluentes mais preciso, facilidade da injeção de aditivos (microrganismos, nutrientes), maior segurança na preservação da qualidade ambiental por não haver contato direto do conteúdo do reator com o ambiente ao longo do processo de tratamento e área requerida para a implementação do sistema é reduzida (Rizzo et al. 2007).

Como técnicas de biorremediação *in situ* a atenuação natural refere-se a um processo passivo de remediação onde as condições naturais do meio, mecanismos físicos, químicos e biológicos (por meio da adaptação dos microrganismos nativos ao contaminante) têm potencial de reduzir ou imobilizar as moléculas contaminantes, sendo necessário a realização de monitoramento em âmbito temporal e espacial juntamente com os indicadores geoquímicos (Lacerda; Navoni; Amaral, 2019).

O método de bioestimulação fundamenta-se na adequação do ambiente contaminado por meio da introdução de nutrientes como fertilizantes orgânicos e inorgânicos, corretivos de acidez, entre outros, na área contaminada, com o intuito de potencializar o crescimento da população de microrganismos, acelerando a degradação das moléculas poluentes (Deon et al. 2012).

A bioaumentação é um método fundamentado na inoculação de microrganismos com alto potencial de degradação. Muito indicado em áreas mais fragilizadas, onde, em função dos elevados teores e complexidade das moléculas contaminantes, tem-se uma baixa taxa de degradação em virtude do número reduzido ou até mesmo a ausência de microrganismos com capacidade de degradação de moléculas específicas, como por exemplo xenobióticos (Jacques et al. 2007).

7.6.2 Fitorremediação

A fitorremediação caracteriza-se pela utilização de diversas espécies vegetais e dos microrganismos a eles associados como ferramenta de contenção, isolamento, redução e remoção dos teores de contaminantes do solo, assegurando a saúde humana e o mantimento dos ecossistemas (Mello, 2020). A fitorremediação é oriunda basicamente de três mecanismos: absorção, volatilização e degradação. O mecanismo

de absorção está presente durante a captação dos nutrientes presentes na solução do solo. Os contaminantes presentes na solução do solo podem ser absorvidos pelas plantas, sendo posteriormente acumulados nas raízes ou translocados para a parte aérea, dependendo das características do elemento e da espécie vegetal. A volatilização do contaminante é proveniente da associação da espécie à população microbiana. Já a degradação ocorre devido à associação de microrganismos às raízes, os quais degradam o contaminante na rizosfera e/ ou pela secreção de enzimas pela planta que são capazes de catalisar as reações químicas de degradação do contaminante em subprodutos com menor ou sem potencial tóxico (Lacerda et al. 2021).

O baixo custo para implementação do método é uma das suas principais vantagens, além de promover uma baixa geração de degradação e desestabilização da área a ser tratada. Porém, alguns fatores ambientais, como o clima e tipo de solo, a concentração e a profundidade dos contaminantes, podem limitar o tratamento (Vasconcellos; Pagliuso; Sotomaior, 2012).

7.6.3 Processos físicos de remediação

Dentre os principais métodos para a remediação de solos contaminados fundamentados em princípios físicos, encontram-se a extração de vapor do solo (*Soil Vapor Extraction*) e extração multifásica (*Multi Phase Extraction*) (Queiroz, 2023).

O método de extração de vapor do solo (*Soil Vapor Extraction*) baseia-se na aplicação de vácuo em pontos estratégicos do solo através de poços de extração para induzir um fluxo controlado de ar que passa pelo solo, carregando os vapores dos compostos orgânicos voláteis, removendo dessa forma os contaminantes presentes nas camadas mais superficiais do solo. Ressalta-se que os gases extraídos são devidamente tratados por filtração, absorção, adsorção por carvão ativado, condensação e incineração para posteriormente serem lançados para a atmosfera (Andrade; Augusto; Jardim, 2010). Nesse caso, se torna mais eficiente em solos de textura arenosa em função da predominância de poros maiores.

O método de extração multifásica é aplicado com o auxílio de uma bomba de vácuo que gera uma pressão negativa, forçando o ar presente no meio poroso a se deslocar para os poços de extração. Com a geração desse fluxo, ocorre um aumento da dessorção dos contaminantes adsorvidos nas partículas de solo, direcionando os compostos voláteis para a superfície. Assim como no método anterior, o vapor extraído também é tratado antes de ser lançado para a atmosfera.

7.6.4 Processos químicos de remediação

Os métodos de remediação fundamentados em princípios químicos utilizam reações químicas para eliminar, transformar ou imobilizar poluentes no solo. São geralmente aplicados *in situ*, porém o processo deve ser conduzido de forma cautelosa devido ao risco de contaminação do lençol freático. Como exemplo, podemos citar a redução química, oxidação química e barreiras reativas.

A oxidação química é realizada através da injeção de produtos químicos reativos no solo contaminado, gerando reações químicas que promovem a oxidação dos mesmos. Em áreas com grau elevado de contaminação, a oxidação química pode ser utilizada como pré-tratamento, propiciando condições mais adequadas para a implementação de outros métodos, como por exemplo, tratamentos biológicos (Andrade; Augusto; Jardim, 2010).

Já a redução química é realizada pela associação de uma fonte de carbono com ferro zero valente, favorecendo a formação de um ambiente extremamente redutor, ocasionando a aceleração da degradação dos contaminantes (Zhao et al. 2020).

As barreiras reativas são fundamentadas pelo princípio de separação por meio da criação de uma zona de reação química gerada artificialmente que filtra os contaminantes que atravessam a barreira, sendo assim, a barreira deve estar posicionada à jusante da pluma de contaminação. Evidencia-se que a quebra e a degradação dos contaminantes não ocorrem exclusivamente por processos químicos, mas também físicos e biológicos. Uma grande vantagem da aplicação desse método é a operação passiva com elevada durabilidade, requerendo pouca manutenção (Budania; Dangayach, 2023; Sakr et al. 2023).

TESTE SEU CONHECIMENTO ©

1) Qual das seguintes ações foi direta consequência da publicação da obra *Primavera Silenciosa*, de Rachel Carson, nos anos 1960?

- a) A adoção do Protocolo de Montreal
- b) A regulamentação da produção e uso do pesticida DDT
- c) A criação da Cúpula da Terra no Rio de Janeiro
- d) A formação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

2) O Protocolo de Cartagena, assinado em 2000, foi estabelecido principalmente para:

- a) Limitar as emissões de gases de efeito estufa e proteger a biodiversidade

- b) Regular a utilização e transporte de organismos geneticamente modificados (OGMs)
- c) Controlar a emissão de substâncias nocivas para a camada de ozônio
- d) Reduzir o desmatamento e a degradação florestal

3) A Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) tem como objetivo principal:

- a) Limitar a importação de produtos químicos perigosos em países subdesenvolvidos
- b) Proibir e eliminar o uso de compostos químicos com características bioacumulativas e toxicológicas
- c) Promover a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias alternativas aos elementos-traço
- d) Reduzir o consumo de combustíveis fósseis em países industrializados

4) Em relação ao Protocolo de Montreal, qual a principal razão para o uso de hidrofluorocarbonos (HFCs) como substitutos temporários dos clorofluorocarbonos (CFCs)?

- a) Possuem menor potencial de aquecimento global (GWP) do que os CFCs
- b) Não contêm átomos de cloro que destroem a camada de ozônio
- c) São mais eficazes em dispositivos de refrigeração e têm custo reduzido
- d) Possuem menor tempo de degradação na atmosfera, reduzindo a poluição

5) Entre os seguintes métodos de remediação, qual é mais indicado para a remoção de hidrocarbonetos voláteis presentes nas camadas superficiais do solo?

- a) Extração multifásica
- b) Bioaugmentação
- c) Extração de vapor do solo (Soil Vapor Extraction)
- d) Biopilhas

6) Qual é a principal função dos biofilmes microbianos na biorremediação de metais pesados?

- a) Aumentar a solubilidade dos metais no solo, facilitando sua mobilização

- b) Adsorver e imobilizar os elementos-traço, prevenindo sua migração
- c) Promover reações de oxidação-redução que alteram o estado de oxidação dos metais
- d) Degradar compostos orgânicos associados aos metais para facilitar sua remoção

7) No contexto da adsorção de contaminantes no solo, qual dos seguintes fatores influencia diretamente a capacidade de retenção de elementos traço no solo?

- a) Teor de matéria orgânica e pH do solo
- b) Presença de organismos biodegradadores e umidade do solo
- c) Aeração do solo e percolação da água no perfil do solo
- d) Temperatura do solo e capacidade de campo

8) Dentre as opções abaixo, qual é uma característica dos organoclorados que contribui para sua alta persistência no ambiente?

- a) Baixa pressão de vapor e alta volatilidade
- b) Alta solubilidade em água e baixa bioacumulação
- c) Presença de ligações covalentes fortes com átomos de cloro
- d) Alta reatividade com radicais livres e baixa toxicidade

9) Em um processo de fitorremediação, qual é a principal função da rizosfera para a absorção e degradação de contaminantes?

- a) Promover a volatilização dos contaminantes para a atmosfera
- b) Facilitar a troca catiônica para absorção de nutrientes e contaminantes
- c) Estabilizar os contaminantes no solo através de compostos orgânicos
- d) Ampliar a atividade enzimática e microbiana para degradação dos poluentes

10) Qual foi a motivação central para o desenvolvimento do Protocolo de Quioto, e qual é seu impacto esperado nos países signatários?

- a) Controlar a poluição transfronteiriça e reduzir as emissões de poluentes atmosféricos

- b) Regular o uso de substâncias químicas perigosas e incentivar práticas sustentáveis no setor industrial
- c) Estabelecer metas de redução de gases de efeito estufa para mitigar mudanças climáticas
- d) Proteger a biodiversidade e criar zonas de conservação ambiental

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGUACIL, F. J.; MERINO, Y.. Biotratamiento de contaminantes de origen inorgánico. **Revista de Metalurgia**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 428-436, 30 out. 1998. Editorial CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.i5.810>.

AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. *The legacy of Rachel Carson's Silent Spring*. Washington, D.C.: American Chemical Society, 2012. 20 p. (National Historic Chemical Landmark).

ANDRADE, Juliano de Almeida; AUGUSTO, Fabio; JARDIM, Isabel Cristina Sales Fontes. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, [S.L.], v. 35, n. 3, p. 17-43, set. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-46702010000300002>.

ANDREAZZA, Robson; CAMARGO, Flávio Anastácio de Oliveira; ANTONIOLLI, Zaida Inês; QUADRO, Maurício Silveira; BARCELOS, Amauri Antunes. Biorremediação de áreas contaminadas com cobre. **Revista de Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 127-133, 3 jan. 2019. Revista de Ciências Agrárias. <http://dx.doi.org/10.19084/RCA.16290>.

ARGUMEDO-DELIRA, Rosalba *et al.* EL GÉNERO FÚNGICO *Trichoderma* Y SU RELACIÓN CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, Si, v. 4, n. 25, p. 257-269, fev. 2009.

BARBOZA, Henriqueta Talita G.; NASCIMENTO, Xênia P. R. do; SILVA, Otniel F.; SOARES, Antonio G.; DACOSTA, João B. N.. Organophosphorus Compounds and their Role in Agriculture. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 172-193, 2018. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180015>.

BISOGNIN, Ramiro Pereira; LÓPEZ, Diosnel Antonio Rodriguez; MULLER, Maria Viviane Gomes; RIEGER, Alexandre. Análise do potencial microbiano de uma biopilha na biorremediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 517-526, jun. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018152421>.

BRASIL. Constituição (2009). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, DOU, 30 dez. 2009.

BUDANIA, Ravindra; DANGAYACH, Sanyam. A comprehensive review on permeable reactive barrier for the remediation of groundwater contamination. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 332, p. 117343, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117343>.

CARSON, Rachel. **Primavera Silenciosa**. São Paulo: Gaia, 2010. Tradução de: Claudia Sant'Anna Martins.

DEON, Maite Carla; DEROSI, Andreia; MAGRO, Clinei dal; REINEHR, Christian Oliveira; COLLA, Luciane Maria. Biorremediação de solos contaminados com resíduos oleosos através de bioaumentação e atenuação natural. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 73-82, 26 abr. 2012. Universidade Estadual de Londrina. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2012v33n1p73>.

EIBL, Regine; EIBL, Dieter. Design of bioreactors suitable for plant cell and tissue cultures. **Phytochemistry Reviews**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 593-598, 22 dez. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11101-007-9083-z>.

FRANCISCO, Wellington Camilo; QUEIROZ, Tânia Márcia de. BIORREMEDIAÇÃO. **Nucleus**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 249-256, 30 abr. 2018. Fundacao Educational de Ituverava. <http://dx.doi.org/10.3738/1982.2278.1700>.

FRANJIC, Sinisa. The Consequences Of Environmental Pollution Can Be Fatal. **Advance In Environmental Waste Management & Recycling**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 47-51, 8 mar. 2021. Opat Group LLC. <http://dx.doi.org/10.33140/aewmr.04.01.07>.

FLORES, Araceli Verônica; RIBEIRO, Joselito Nardy; NEVES, Antonio Augusto; QUEIROZ, Eliana Lopes Ribeiro de. Organoclorados: um problema de saúde pública. **Ambiente & Sociedade**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 111-124, dez. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1414-753x2004000200007>.

GAYLARDE, Christine Claire; BELLINASSO, Maria de Lourdes; MANFIO, Gilson Paulo. Biorremediação: aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, Si, v. 1, n. 34, p. 36-43, jun. 2005.

GONÇALVES, Darly Prado. **Principais desastres ambientais no Brasil e no mundo**. 2017. Jornal da Unicamp. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2017/12/01/principais-desastres-ambientais-no-brasil-e-no-mundo>. Acesso em: 13 nov. 2023.

HADLICH, G. M.; UCHA, J. M.. Extração EDTA e fracionamento sequencial de cobre e de zinco em solos adubados com dejetos de suínos e fertilizantes minerais. **Cadernos de Geociências**, v. 10, p. 45-52, 2013.

JACQUES, Rodrigo Josemar Seminoti; BENTO, Fátima Menezes; ANTONIOLLI, Zaida Inês; CAMARGO, Flávio Anastácio de Oliveira. Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 1192-1201, ago. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782007000400049>.

KEMERICH, Pedro Daniel da Cunha; FLORES, Carlos Eduardo Balestrin; BORBA, Willian Fernando de; GERHARDT, Ademir Eloi; FLORES, Bruno Acosta; RODRIGUES, Alexandre Couto; BARROS, Guilherme. Indicativo de contaminação ambiental por metais pesados em aterro sanitário. **Revista Monografias Ambientais**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 3744-3755, 26 nov. 2014. Universidad Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/2236130814441>.

KUMARI, Sangita. Environmental Chemistry: a study on air pollution. **Procedure International Journal Of Science And Technology**, [S.L.], v. 1, n. 5, p. 1-2, 2024. Institute of Science and Technology Development. <http://dx.doi.org/10.62796/pijst.2024v1i502>.

LACERDA, Eliseu Melo Carvalho; SANTANA, Willian Lázaro Alves Muniz de; CARDOSO FILHO, Milton Santos; SANTOS, Naiara Cristina Pereira dos; MOREIRA, Ícaro Thiago Andrade. Processos enzimáticos na biorremediação e fitorremediação de petróleo em sedimentos de manguezal: uma revisão. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 1-15, 8 set. 2021. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19944>.

LACERDA, Felipe; NAVONI, Julio Alejandro; AMARAL, Viviane Souza do. **BIORREMEDIAÇÃO**: educação em saúde e alternativas à poluição ambiental. Natal: Ifrn, 2019. 80 p.

LINHARES, Lucília Alves; EGREJA FILHO, Fernando Barbosa; OLIVEIRA, Cristiane Valéria de; BELLIS, Vito Modesto de. Adsorção de cádmio e chumbo em solos tropicais altamente intemperizados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 44, n. 3, p. 291-299, mar. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2009000300011>.

MAILA, Mphekgo P.; CLOETE, Thomas E.. Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: are simplicity and cost-effectiveness the only advantages?. **Reviews In Environmental Science And Bio/Technology**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 349-360, dez. 2004. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11157-004-6653-z>.

MELLO, Antônio José Plácido de. **Fitorremediação em solos contaminados com herbicidas**. Curitiba: Appris, 2020. 75 p.

NETTO, Annibal D. Pereira; MOREIRA, Josino C.; DIAS, Ana Elisa X. O.; ARBILLA, Graciela; FERREIRA, Luiz Filipe V.; OLIVEIRA, Anabela S.; BAREK, Jiri. Avaliação da contaminação humana por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e seus derivados nitrados (NHPAs): uma revisão metodológica. **Química Nova**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 765-773, dez. 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422000000600010>.

OLIVEIRA-FILHO, Eduardo Cyrino; MUNIZ, Daphne Heloisa de Freitas. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 83-100, 29 abr. 2008. Centro de Ensino Unificado de Brasília. <http://dx.doi.org/10.5102/ucs.v4i1.24>.

ERNANI, Paulo Roberto. Química do Solo e Disponibilidade de Nutrientes. 2. ed. Lages: O Autor, 2016. 256 p.

PAYE, Henrique de Sá; MELLO, Jaime Wilson Vargas de; MELO, Stefeson Bezerra de. Métodos de análise multivariada no estabelecimento de valores de referência de qualidade para elementos-traço em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 1031-1042, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000300033>.

PIMENTEL, Marcia. Soil Erosion. **Food, Energy, And Society, Third Edition**, [S.L.], p. 201-219, 4 out. 2007. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420046687.ch15>.

PRAKASH, Jigyasa; AGRAWAL, Shashi Bhushan; AGRAWAL, Madhoolika. Global Trends of Acidity in Rainfall and Its Impact on Plants and Soil. **Journal Of Soil Science And Plant Nutrition**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 398-419, 17 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-022-01051-z>.

QUEIROZ, Taciana da Costa. Métodos eficientes para remediação de Dinitrotoluenos (DNT) em solos e corpos hídricos. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 164-179, 10 jun. 2023. Zenodo. <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.8023723>.

RECK, Isabela Maria; PAIXÃO, Rebecca Manesco. IMPACTOS AMBIENTAIS DOS CORANTES AZO E TRATAMENTOS DE REMOÇÃO: UMA REVISÃO. **Revista Uningá Review**, Si, v. 28, n. 2, p. 61-66, out. 2016.

RIZZO, Andréa C. de Lima *et al.* **Série de tecnologia ambiental: biorremediação de solos contaminados por petróleo: ênfase no uso de biorreatores**. Rio de Janeiro: Cetem, 2007. 76 p.

SAKR, Marwa; AGAMAWI, Hadel El; KLAMMLER, Harald; MOHAMED, Mohamed M.. A review on the use of permeable reactive barriers as an effective technique for groundwater remediation. **Groundwater For Sustainable Development**, [S.L.], v. 21, p. 100914, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100914>.

SCHWEITZER, Linda; NOBLET, James. Water Contamination and Pollution. **Green Chemistry**, [S.L.], p. 261-290, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-809270-5.00011-x>.

SIGURDARSON, Jens Jakob; SVANE, Simon; KARRING, Henrik. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. **Reviews In Environmental Science And Bio/Technology**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 241-258, 17 abr. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11157-018-9466-1>.

SUPPI, Ilana; CAMPOS, Mari; MIQUELLUTI, David; MACHADO, Matheus. Teores de vanádio, molibdênio e antimônio em solos de diferentes litologias em Santa Catarina. **Química Nova**, [S.L.], 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170768>.

UNEP. **Marcos ambientais**: linha do tempo dos 75 anos da onu. Linha do tempo dos 75 anos da ONU. 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/news-and-stories/story/environmental-moments-un75-timeline>. Acesso em: 14 nov. 2023.

UNESP. **Poluentes Orgânicos Recalcitrantes ou Persistentes**. Acervo digital da UNESP. Disponível em: https://acervodigital.unesp.br/bitstream/123456789/39958/17/qui_m4d8_tm03_box4.pdf. Acesso em: 07 fev. 2014.

VASCONCELLOS, Maria Cristina; PAGLIUSO, Débora; SOTOMAIOR, Vanessa Santos. Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo. **Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade**, v. 83, p. 261-267, 2012.

YAHYA, Mukhtar Nuhu; GÖKÇEKÜŞ, Hüseyin; ORHON, Derin; KESKINLER, Bülent; KARAGUNDUZ, Ahmet; OMWENE, Philip Isaac. A Study on the Hydrolysis of Urea Contained in Wastewater and Continuous Recovery of Ammonia by an Enzymatic Membrane Reactor. **Processes**, [S.L.], v. 9, n. 10, p. 1703, 23 set. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/pr9101703>.

ZHAO, Mingyue; ZHANG, Changai; YANG, Xianni; LIU, Li; WANG, Xiaozhi; YIN, Weiqin; LI, Yuncong C.; WANG, Shengsen; FU, Weizhang. Preparation of highly-conductive pyrogenic carbon-supported zero-valent iron for enhanced Cr() reduction. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 396, p. 122712, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122712>.

GABARITO

CAPÍTULO I

- 01 c) Magmáticas, metamórficas e sedimentares.
- 02 d) Coloração e minerais.
- 03 a) Extrusivas e intrusivas.
- 04 b) Contração e retração devido a temperatura, hidrólise de minerais e liberação de exsudatos radiculares.
- 05 d) Material de origem, relevo, clima, organismos vivos e tempo.
- 06 e) Conjunto de processos naturais que resultam na decomposição e alteração das rochas e outros materiais.
- 07 b) Adição, remoção, translocação e transformação.
- 08 d) Argiluviação, gleização, podzolização e latolização.
- 09 a) Latolização.
- 10 c) Argiluviação e podzolização.

CAPÍTULO II

- 01 c) Água, minerais dissolvidos e compostos orgânicos.
- 02 b) F, V, F, F.
- 03 a) octaédrica; tetraédricas b) tetraedro; octaedro c) hematita; hexagonal.
- 04 V, F, F, F.
- 05 2, 3, 1, 4.
- 06 a) Melhoria na estrutura do solo e aumento da capacidade de retenção de água.
- 07 V, V, F.
- 08 c) As cargas elétricas dependentes do pH são comuns nas bordas dos argilominerais e na superfície de óxidos e matéria orgânica, sendo influenciadas pelo pH do solo.
- 09 b) Al^{3+} trocável e grupos funcionais de argila e matéria orgânica.
- 10 a) Melhoria na estrutura do solo e aumento da capacidade de retenção de água.

11) Resposta esperada: O uso de fertilizantes amoniacais pode aumentar a acidez do solo devido à nitrificação, onde o amônio (NH_4^+) é transformado em nitrato (NO_3^-), liberando íons H^+ e acidificando o solo. A calagem corrige essa acidez pela aplicação de calcário (CaCO_3), que neutraliza os íons H^+ e eleva o pH do solo, reduzindo a acidez.

CAPÍTULO III

- 01 c) Cor do solo.
- 02 b) Horizonte orgânico composto por material em decomposição.
- 03 c) Hematita.
- 04 b) Goethita.
- 05 b) Presença significativa de matéria orgânica.
- 06 a) Horizonte A.
- 07 b) A quantidade de água que o solo pode reter após a drenagem.
- 08 d) Horizonte C.
- 09 b) Permite a descrição e classificação das propriedades químicas e biológicas do solo em diferentes profundidades.
- 10 a) Solos com alto teor de argila têm alta retenção de água, mas baixa aeração.

CAPÍTULO IV – Sem gabarito

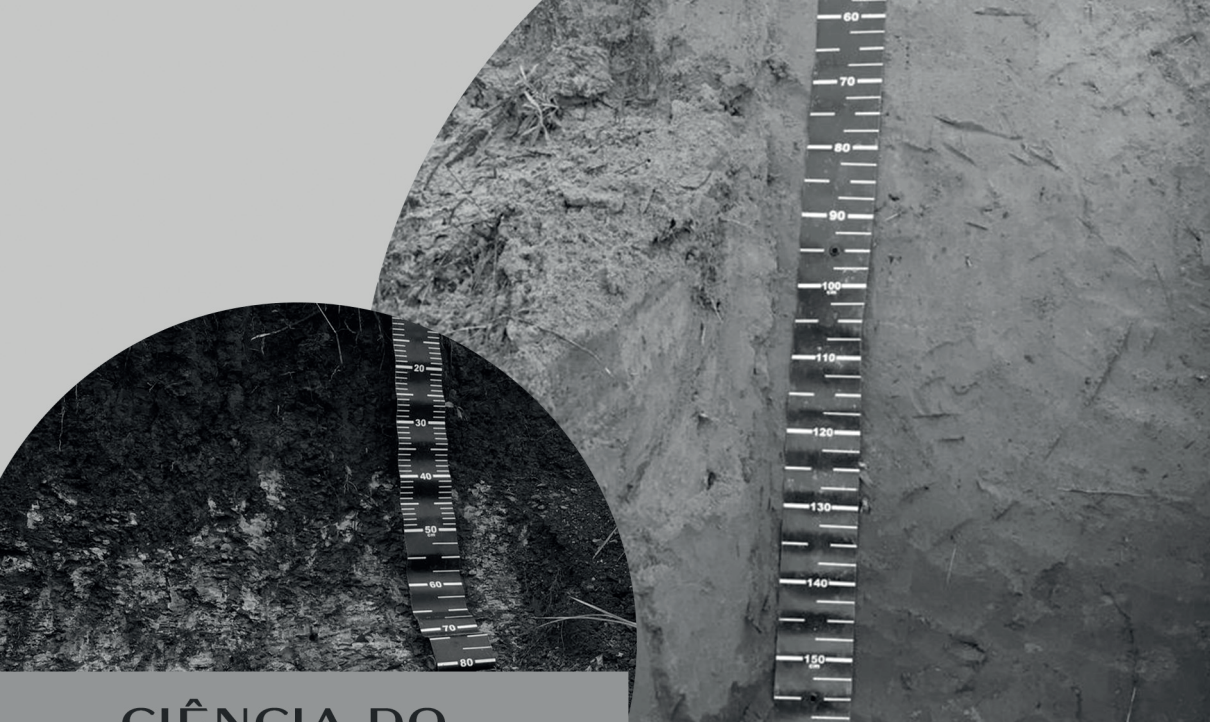
CAPÍTULO V- Sem questionário e gabarito

CAPÍTULO VI

- 01 c) Produção direta de oxigênio.
- 02 b) Resíduos florestais, raízes das árvores e organismos específicos.
- 03 c) A liberação de nutrientes dos minerais ocorre de forma lenta.
- 04 b) Toxicidade de alumínio.
- 05 c) Aumentar a concentração de alumínio.
- 06 b) Conjunto de folhas, galhos e outros detritos orgânicos na superfície do solo.
- 07 d) Temperatura da atmosfera superior (estratosfera).
- 08 c) Acelerando a decomposição da matéria orgânica e melhorando a estrutura do solo.
- 09 c) A serapilheira é fundamental no processo de ciclagem.
- 10 c) O solo e o clima juntos determinam os tipos de vegetação que se desenvolvem.

CAPÍTULO VII

- 01 b) A regulamentação da produção e uso do pesticida DDT.
- 02 b) Regular a utilização e transporte de organismos geneticamente modificados (OGMs).
- 03 b) Proibir e eliminar o uso de compostos químicos com características bioacumulativas e toxicológicas.
- 04 b) Não contêm átomos de cloro que destroem a camada de ozônio.
- 05 c) Extração de vapor do solo (Soil Vapor Extraction).
- 06 b) Adsorver e imobilizar os elementos-traço, prevenindo sua migração.
- 07 a) Teor de matéria orgânica e pH do solo.
- 08 c) Presença de ligações covalentes fortes com átomos de cloro.
- 09 d) Ampliar a atividade enzimática e microbiana para degradação dos poluentes.
- 10 c) Estabelecer metas de redução de gases de efeito estufa para mitigar mudanças climáticas.



CIÊNCIA DO

SOLO

PARA GRADUANDOS

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br



CIÊNCIA DO

SOLO

PARA GRADUANDOS

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br