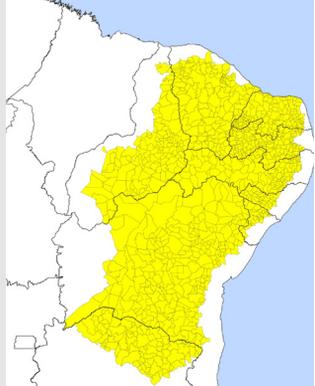


Fundamentos de Fertilidade do SOLO

Josinaldo Lopes Araújo Rocha
Alexandre Paiva da Silva
Leônidas Canuto dos Santos
Pedro Jorge da Silva Severo

 eduepb





Universidade Estadual da Paraíba
Prof^ª. Célia Regina Diniz | *Reitora*
Prof^ª. Ivonildes da Silva Fonseca | *Vice-Reitora*



Editora da Universidade Estadual da Paraíba
Cidoval Morais de Sousa | *Diretor*

Conselho Editorial

Alessandra Ximenes da Silva (UEPB)
Alberto Soares de Melo (UEPB)
Antonio Roberto Faustino da Costa (UEPB)
José Etham de Lucena Barbosa (UEPB)
José Luciano Albino Barbosa (UEPB)
Melânia Nóbrega Pereira de Farias (UEPB)
Patrícia Cristina de Aragão (UEPB)



Editora indexada no SciELO desde 2012



Editora filiada a ABEU

EDITORA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
Rua Baraúnas, 351 - Bairro Universitário - Campina Grande-PB - CEP 58429-500
Fone: (83) 3315-3381 - <http://eduepb.uepb.edu.br> - email: eduepb@uepb.edu.br

Josinaldo Lopes Araújo Rocha
Alexandre Paiva da Silva
Leônidas Canuto dos Santos
Pedro Jorge da Silva Severo

Fundamentos de
Fertilidade do
SOLO



Campina Grande-PB

2024



Editora da Universidade Estadual da Paraíba

Cidoval Morais de Sousa (*Diretor*)

Expediente EDUEPB

Design Gráfico e Editoração

Erick Ferreira Cabral
Jefferson Ricardo Lima A. Nunes
Leonardo Ramos Araujo

Revisão Linguística e Normalização

Antonio de Brito Freire
Elizete Amaral de Medeiros

Assessoria Técnica

Carlos Alberto de Araujo Nacre
Thaise Cabral Arruda
Walter Vasconcelos

Divulgação

Danielle Correia Gomes

Comunicação

Efigênio Moura

Depósito legal na Câmara Brasileira do Livro - CDL

F981 Fundamentos de fertilidade do solo [recurso eletrônico] /
organização de Josinaldo Lopes Araújo Rocha ... [et al].
– Campina Grande : EDUEPB, 2024.
194 p. : il. color. ; 15 x 21.

ISBN: 978-65-87171-70-8 (Impresso)

ISBN: 978-65-87171-71-5 (4.485 KB - PDF)

ISBN: 978-65-87171-72-2 (1.200 KB - Epub)

1. Solos. 2. Fertilidade do Solo. 3. Manejo do Solo. I. Rocha, Josinaldo Lopes Araújo. II. Silva, Alexandre Paiva da. III. Santos, Leônidas Canuto dos. IV. Severo, Pedro Jorge da Silva. V. Título.

21. ed. CDD 631.44

Ficha catalográfica elaborada por Fernanda Mirelle de Almeida Silva - CRB - 15/483

Copyright © EDUEPB

A reprodução não-autorizada desta publicação, por qualquer meio, seja total ou parcial, constitui violação da Lei nº 9.610/98.

SUMÁRIO

1

IMPORTÂNCIA DA FERTILIDADE DO SOLO	9
1.1 Breve histórico da Fertilidade do Solo.....	9
1.2 Fertilidade do solo e fatores de formação.....	12
1.3 Solo fértil e solo produtivo.....	15
1.4 Fertilidade do solo no semiárido.....	17

2

LEIS DA FERTILIDADE DO SOLO	21
2.1 Lei da Restituição.....	21
2.2 Lei do Mínimo ou de Liebig.....	22
2.3 Lei dos incrementos decrescentes.....	24
2.4 Lei do Máximo.....	25

3

AS FASES DO SOLO	27
3.1 Fase sólida: Composição e características.....	28
3.2 Origem das cargas elétricas do solo.....	32
3.3 Fase líquida.....	38
3.4 Fase gasosa.....	41
3.5 Transporte de nutrientes para as raízes.....	43

4

ACIDEZ DO SOLO E CALAGEM	51
4.1 Origem da acidez do solo	51
4.2 Componentes da acidez do solo	54
4.3 Causa do pouco crescimento das plantas em solos ácidos	57
4.4 Correção da acidez do solo	58
4.5 Corretivos da acidez do solo	60
4.6 Características dos corretivos	61
4.7 Métodos para recomendação da necessidade de calagem	62
4.8 Aspectos práticos da calagem	66

5

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	73
5.1 Aspectos gerais	73
5.2 Compartimentos da matéria orgânica do solo	74
5.3 Funções da matéria orgânica do solo	78
5.4 Decomposição da matéria orgânica do solo	82

6

MACRO E MICRONUTRIENTES NO SOLO	87
6.1 Nitrogênio	87
6.2 Fósforo no solo	94
6.3 Potássio no solo	99
6.4 Cálcio e magnésio no solo	102
6.5 Enxofre no solo	105
6.6 Micronutrientes no solo	109

7

AMOSTRAGEM PARA DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO	115
7.1 Aspectos gerais	115
7.2 Conceitos importantes	115
7.3 Seleção da área	117
7.4 Coleta da amostra de solo	119
7.5 Profundidade de amostragem.....	122
7.6 Processamento das Amostras	123
7.7 Frequência de amostragem.....	124

8

INTERPRETAÇÃO DA ANÁLISE DE SOLO	125
8.1 Unidades usuais em fertilidade do solo.....	125
8.2 Tabelas de interpretação dos resultados	134
8.3 Recomendação de adubação	137

9

CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES	145
9.1 Características químicas dos fertilizantes minerais	145
9.2 Características físicas dos fertilizantes minerais.....	152
9.3 Características físico-químicas dos fertilizantes minerais.....	157
9.4 Fertilizantes orgânicos	159

10

SOLOS COM EXCESSO DE SAIS E SÓDIO TROCÁVEL	163
10.1 Aspectos gerais	163
10.2 Recuperação de solos afetados pela salinidade.....	166

11

SÍNTESE SOBRE MANEJO DE NUTRIENTES EM SOLOS TROPICAIS..... 173

REFERÊNCIAS 179

SOBRE OS ORGANIZADORES..... 193

1

IMPORTÂNCIA DA FERTILIDADE DO SOLO

1.1 Breve histórico da Fertilidade do Solo

Não podemos começar a falar de fertilidade do solo sem antes voltarmos a um passado distante que nos remonta ao surgimento da agricultura. O homem, antes nômade, caçador-coletor, buscava seu alimento de maneira muito rudimentar, ao tempo em que o alimento se tornava escasso ele migrava para outras áreas. No entanto, há aproximadamente 12 mil anos o homem inicia o processo de domesticação de plantas e animais, neste momento, o homem deixa de ser nômade e torna-se sedentário, com isso surgem também as primeiras civilizações e cidades. Numa região conhecida como crescente fértil, onde hoje se encontra o oriente médio, área banhada por alguns rios iniciou-se os primeiros sistemas de produção agrícola, isso era possível, pois estes rios ao passarem por um aumento de seu volume de água havia o transbordamento que colocava a matéria orgânica em suspensão e com as enchentes fertilizava as margens.

A preocupação com a manutenção da fertilidade do solo ocorre desde a antiguidade, quando os gregos já recomendavam, ainda que intuitivamente, a aplicação de esterco e água de esgoto nos solos que consideravam como “mais fraco”. Teofrasto (372 – 287 a.C) recomendava usar de forma abundante esterco nos solos rasos, mas os solos ricos deveriam ser menos adubados. Da mesma forma, romanos e gauleses já utilizavam margas (material à base de argila e calcário) para melhorar o solo onde eram cultivados cereais e videiras. Intuitivamente os povos antigos se preocupavam em manter a fertilidade do solo através da aplicação de materiais que julgavam conservar os “elementos responsáveis” pelo crescimento e produtividade das culturas.

Nos dias atuais, há muita pesquisa disponível acerca das técnicas de conservação do solo, apesar de em sua grande maioria não ser aplicada pelos proprietários rurais em muitas regiões do Brasil, especialmente, naquelas mais pobres como na Região Norte e no semiárido do Nordeste. Contudo, as causas da falta de aplicação do conhecimento da Ciência do Solo para sua conservação não serão abordadas neste livro.

A manutenção da qualidade do solo nos agroecossistemas é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas de produção e conservação do solo. Sobre este prisma, um dos aspectos fundamentais para a conservação do solo é o adequado manejo de sua fertilidade, com vistas a manutenção de sua capacidade produtiva, dos níveis de nutrientes, de matéria orgânica e da atividade biológica.

Em muitas áreas do semiárido nordestino, apesar de todo conhecimento científico acumulado na região, ainda se adota sistemas arcaicos de cultivo, onde áreas exploradas com culturas anuais, anos após anos são abandonadas pela baixa produtividade adquirida em função da exaustão de nutrientes e matéria orgânica do solo. A decadência dos níveis de fertilidade nestas áreas torna a atividade agrícola economicamente inviável. Assim, estas áreas

ficam expostas aos agentes erosivos, tais como água e vento, resultando na remoção da camada de solo contendo as superfícies de adsorção mais ativas (argilas e matéria orgânica) levando com o tempo a degradação dos solos. Na verdade, estes solos poderiam continuar produzindo satisfatoriamente se fossem aplicadas técnicas simples como a rotação de culturas, para enriquecimento do solo com matéria orgânica e atender uma das importantes leis da fertilidade do solo, ou seja, a “Lei da Restituição”, começando pela análise de solo seguido das recomendações necessárias.

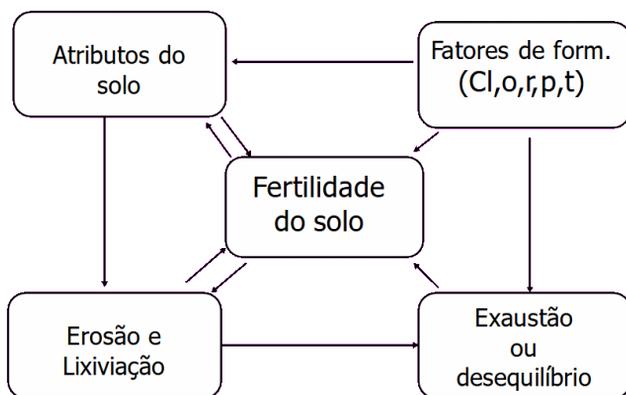
Estima-se que apenas 1,33% da superfície da Terra seja agricultável, admitindo-se que 75% compreendem os oceanos e 23,67% seja ocupada por rios, lagos, desertos, florestas muito acidentadas e geleiras. Portanto, resta um resíduo da superfície do planeta para se produzir alimentos, fibras e diversos tipos de matéria-prima. Dos solos que constituem este resíduo, poucos são naturalmente férteis, a exemplo da Terra Preta de Índio na Amazônia.

No Brasil, aproximadamente de 63% da área de solos é afetada por acidez elevada e Al e 25% destas áreas apresentam elevada fixação de P (Novais *et al.*, 2007). Contudo, muitos solos mesmo sendo férteis não necessariamente são produtivos, pois podem apresentar impedimentos físicos como elevada pedregosidade, baixa profundidade efetiva, elevada compactação ou apresentarem impedimentos químicos como elevada salinidade, excesso de sódio, excesso de alumínio, ou outros elementos considerados tóxicos para as plantas ou estarem localizados em área sob baixa precipitação pluviométrica. Por outro lado, há muitos solos que apresentam baixa fertilidade natural, mas possuem atributos físicos favoráveis ao desenvolvimento das plantas e, portanto, podem vir a se tornar produtivos desde que sejam adotadas as práticas de manejo que se apoiam na conservação do solo, adubação, correção do pH com a calagem e melhoria do ambiente subsuperficial através da gessagem.

1.2 Fertilidade do solo e fatores de formação

Há uma estreita relação entre a fertilidade do solo com os fatores de formação do solo (Figura 1). A disponibilidade imediata e a reserva de nutrientes dependem não apenas da riqueza do material de origem, mas também da intensidade do processo de lixiviação/lavagem do solo proporcionado pelo clima, da natureza da rocha e sua susceptibilidade ao processo de intemperismo aliado a atividade dos organismos, os quais podem contribuir com a adição de nutrientes no solo pelo processo de biociclagem. De outra forma, os organismos do solo podem contribuir com o processo de lavagem do solo elevando sua porosidade ou ainda podem contribuir para diminuir o processo de remoção de solo por erosão, aumentando o teor de matéria orgânica e assim aumentando o movimento de água no perfil do solo. O relevo é outro fator fundamental neste processo, uma vez que pode aumentar ou diminuir o processo de lavagem e/ou, as perdas de solo.

Figura 1. Inter-relações entre fertilidade do solo e diversos processos e fenômenos que ocorrem no solo.



Legenda: clima (Cl), organismos (o), relevo (r), material de origem (p) e tempo (t).

Fonte: Autoria própria.

Pela atuação dos fatores de formação do solo, fica evidente que os mesmos interferem diretamente nos seus atributos químicos, físicos e biológicos. Estes atributos por sua vez exercem influência sobre a fertilidade do solo, pois contribuem com o acúmulo ou com a remoção de nutrientes de seu perfil (Figura 1). A título de exemplo cita-se a porosidade do solo, em especial a macroporosidade, que dependendo da pluviosidade ou da lâmina de irrigação pode contribuir para a remoção de elementos móveis como o potássio e o nitrogênio. Por outro lado, a fertilidade do solo pode ser favorecida pelos atributos que favorecem a atividade biológica e o crescimento das plantas que, em última instância, podem elevar o processo de adição de carbono e nutrientes ao solo.

A exaustão é outro fator de relevante influência na fertilidade do solo, na medida em que leva ao depauperamento de sua fertilidade e inviabiliza o desenvolvimento das plantas. De acordo com Lopes & Guilherme (2007) a presença de nutrientes é um dos aspectos fundamentais que garante a boa qualidade do solo, seu bom uso e manejo, principalmente em agroecossistemas. Esse efeito ocorre quando se realizam monocultivos, ano após ano, na mesma área, sem a restituição dos nutrientes extraídos. Uma das formas de se evitar este tipo de processo, além da adubação, é a prática da rotação de culturas, já que culturas diferentes têm exigências nutricionais diferentes, promovendo um maior equilíbrio de nutrientes no solo. Ressalta-se que a susceptibilidade do solo ao processo de exaustão está também relacionada com os fatores de formação do solo, pois o grau de intemperização do solo influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes.

Além das plantas, o processo de erosão é um dos grandes responsáveis pela perda de fertilidade do solo. O tipo de erosão mais predominante depende das condições climáticas da região. Na região semiárida, em especial sob Bioma Caatinga, devido a pouca profundidade da maior parte dos solos, ocorre mais intensamente

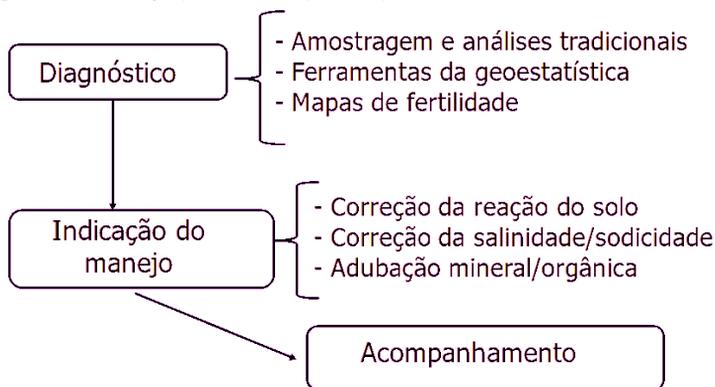
a erosão laminar proporcionada pelo vento e pela água das chuvas. Esse processo remove a camada de solo mais rica em minerais com maior superfície de adsorção de nutrientes e também a matéria orgânica do solo, além das sementes. Para nutrientes móveis no solo como o potássio, cálcio, magnésio, enxofre e nitrogênio, a perda das camadas superficiais de adsorção (argila e matéria orgânica coloidal) representam perdas desses nutrientes por lixiviação e erosão. Contudo, nutrientes de baixa mobilidade no solo como o fósforo, também pode ser perdido pelo processo erosivo, sem haver necessariamente lixiviação, pois este será transportado juntamente com o solo removido como sedimentos.

Desequilíbrios químicos no solo também podem contribuir com sua degradação mais rapidamente. Uma das formas mais graves de desequilíbrio químico no solo, especialmente solos da região semiárida, onde há baixa precipitação e alta evapotranspiração, é o processo de salinização e sodificação. A salinização dos solos é um dos principais problemas relacionados com a perda de produtividade das culturas. Estima-se que os prejuízos anuais no mundo inteiro na produção agrícola, devido a salinidade, cheguem a cerca de 12 bilhões de dólares (Qadir *et al.*, 2007). Além disso, a salinidade proporciona efeitos ambientais e sociais negativos devido ao abandono das áreas afetadas e abertura de novas áreas para a exploração agrícola.

Quando se deseja tomar medidas para solucionar problemas relacionados com a fertilidade do solo, o ponto de partida é o diagnóstico (Figura 2), o qual pode ser feito por meio da análise do solo, que pode envolver metodologias tradicionais ou mais sofisticadas, dependendo dos objetivos e metas estabelecidas. As amostras obtidas na propriedade podem ser ou não georreferenciadas. Caso sejam, pode-se elaborar mapas de fertilidade, com o qual é possível o manejo mais apropriado como práticas de calagem, adubação mineral e, ou orgânica em taxas variáveis, ou

seja, doses diferentes para situações diferentes. Da mesma forma, adota-se para os problemas com excesso de sais e de sódio. Para se verificar o efeito das medidas adotadas, é necessário fazer o acompanhamento por meio de novas amostragens de solo e posterior análises (Figura 2).

Figura 2. Modo de ação para solucionar possíveis problemas relacionados com a fertilidade do solo.



Fonte: Autoria própria.

1.3 Solo fértil e solo produtivo

Solo Fértil: é aquele que contém, em quantidades suficientes e balanceadas, todos os elementos essenciais em formas absorvíveis às plantas, além de ausência de elementos tóxicos ao desenvolvimento vegetal.

Com isso podemos dividir a fertilidade do solo em 3 tipos:

1. Fertilidade natural – relaciona-se com a formação natural do solo. O material de origem como fonte de nutrientes às plantas a partir dos fatores de intemperização (ver Figura1);

2. Fertilidade potencial – relaciona-se às condições do solo como um limitante ao fornecimento de nutrientes às plantas, como por exemplo solos ácidos, salinos e sódicos;
3. Fertilidade atual – relaciona-se a condição atual do solo após ação antrópica a partir de práticas de manejo, como por exemplo adubação mineral e/ou orgânica a fim de aumentar a capacidade do solo em fornecer nutrientes às plantas.

Solo Produtivo – é aquele que, sendo fértil, se encontram localizados numa zona climática capaz de proporcionar suficiente umidade, luz, calor, etc, para o bom desenvolvimento das plantas nele cultivadas.

Desta forma, apenas os atributos químicos do solo favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas não garante produtividades adequadas. Os atributos físicos como densidade do solo, profundidade, relevo, capacidade de infiltração de água podem ser limitantes à produção das culturas.

Deve-se ter em mente que a produção de uma cultura não depende apenas do solo, mas de uma série de fatores tais como:

- Sementes
- Umidade
- Temperatura
- Luminosidade
- Época de plantio
- Tratos culturais
- Rotação de culturas
- Cobertura viva ou morta
- Manejo integrado de pragas e doenças
- Densidade de plantio
- Adubação equilibrada
- Etc.

1.4 Fertilidade do solo no semiárido

Na região semiárida encontra-se a Caatinga, que é um dos biomas mais ameaçados do globo, em função da exploração indiscriminada dos seus recursos naturais e de sua biodiversidade, tendo como principais causas o desmatamento e as queimadas de espécies nativas para fins de retirada de lenha e fabricação de carvão vegetal (Menezes *et al.*, 2002; Menezes *et al.*, 2005). Neste bioma, a retirada da vegetação natural, aliada aos longos períodos de estiagem, provoca uma acentuada degradação do solo, deixando-o descoberto e exposto por mais tempo à ação dos agentes erosivos. Estes efeitos reduzem conseqüentemente, o potencial produtivo dos solos, causando danos muitas vezes irreversíveis ao meio (Garlindo *et al.*, 2008), levando o bioma ao processo de desertificação em função das perdas de sementes, matéria orgânica e nutrientes (Sampaio *et al.*, 1995).

Outra prática adotada, nesta região, que intensifica ainda mais esse processo é a queima dos resíduos vegetais gerados pelo desmatamento. Embora, haja uma liberação rápida de nutrientes minerais presentes nas cinzas, como o cálcio, o magnésio e o potássio; grande parte do nitrogênio e do carbono são perdidos por volatilização, com conseqüente destruição do reservatório de matéria orgânica do solo e comprometimento de sua atividade biológica. Além das perdas de nutrientes na biomassa cortada e queimada, ocorrem transformações significativas nos estoques de matéria orgânica e nutrientes do solo, com tendência de rápida diminuição dos reservatórios de nutrientes associados à matéria orgânica nos meses imediatamente subsequentes à queima (Fraga & Salcedo, 2004).

Nesse contexto, há necessidade urgente da implantação de medidas que possam reverter este cenário, tendo em vista que o processo de desertificação da Caatinga tem implicações não

apenas ambientais, mas também socioeconômicas, uma vez que a população local é fortemente dependente dos recursos naturais desse bioma. Uma das formas de se reverter esse processo é o reflorestamento com espécies nativas.

A maior parte da vegetação de Caatinga encontra-se sob Luvisolos (Brasil, 1972). Estes solos são caracterizados por apresentar geralmente elevados teores trocáveis de cálcio, magnésio e potássio, mas apresentam sérias limitações quanto aos teores de matéria orgânica, nitrogênio, enxofre, fósforo, boro e micronutrientes catiônicos (EMBRAPA, 2006). Estas limitações são intensificadas principalmente sob processo de degradação devido a retirada da vegetação, o que leva a perdas por erosão (Andrade, 2013). Devido à baixa profundidade e elevada pedregosidade destes solos, as áreas sob Luvisolos geralmente não são utilizadas para o cultivo agrícola, sendo normalmente utilizadas com pastagem natural. Contudo, devido a aceleração da degradação pelo pisoteio de animais, a revegetação com espécies nativas é a melhor indicação para estes solos.

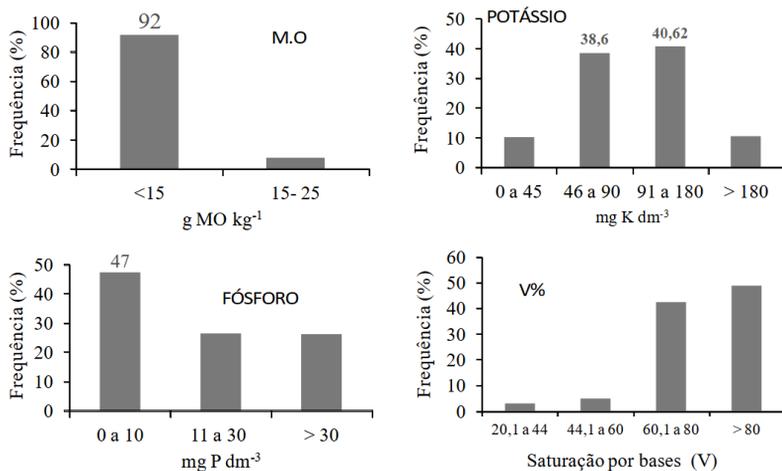
No que se refere ao diagnóstico da fertilidade do solo no semiárido, as informações disponíveis ainda são incipientes, não obstante algumas pesquisas já foram realizadas por pesquisadores espalhados em diversas universidades do Nordeste como a UFPE, UFC, UFPB, UEPB, UFCG dentre outras.

No trabalho realizado por Silveira *et al.* (2006) com 10 classes de solos representativos do Estado da Paraíba e de Pernambuco, os autores, observaram que o pH do solo variou de 5,1 (Neossolo Quartzarênico) a 6,2 (Neossolo Flúvico). Os teores de matéria orgânica ficaram na faixa de 4,8 g/kg (Neossolo Quartzarênico) a 18,6 g/kg (Neossolo Flúvico). Os teores de P-Mehlich apresentaram ampla variação entre os solos, sendo encontrado teores de 1,0 mg/kg⁻¹ em Cambissolo, Planossolo e Neossolo Regolítico até 202mg/kg no Neossolo Flúvico. Em geral, neste trabalho ficou

demonstrado que a maioria destes solos apresentam grande limitação de matéria orgânica e fósforo, inclusive quando se considera os teores totais deste nutriente no solo.

Outro trabalho relevante foi realizado por Brito (2010) num trabalho de monografia realizado no Centro de Saúde e Tecnologia Rural da UFCG (Campus de Patos). A autora avaliou a fertilidade do solo de 645 amostras distribuídas nos estados da Paraíba, Ceará, Pernambuco e Rio Grande do Norte. Parte destes resultados são apresentados na Figura 3. Assim como observado por Silveira *et al.* (2006), Brito (2010) observou que mais de 90% das amostras apresentavam teores baixos de matéria orgânica, 47% com teores baixos de fósforo. Por outro lado, os teores de potássio, na maioria das amostras encontravam-se de médio a altos, assim como a saturação por bases.

Figura 3. Distribuição da frequência para teores de matéria orgânica (M.O), potássio, fósforo e saturação por bases em solos do semiárido nordestino.



Fonte: Brito (2010).

2

LEIS DA FERTILIDADE DO SOLO

2.1 Lei da Restituição

Os nutrientes do solo são perdidos naturalmente pela extração e exportação pela parte colhida da planta, de modo que os teores desses elementos tendem a diminuir a cada safra. Além da extração e exportação de nutriente pelas plantas, os processos erosivos e de compactação do solo contribuem para o declínio da fertilidade. Na tabela 1, pode-se observar as quantidades de nutrientes que são exportados pela cultura da soja em kg/ha, para cada produtividade atingida.

Assim sendo, é indispensável a restituição de todos os nutrientes que são retirados do solo, a fim de se evitar o seu empobrecimento nutricional e conseqüente declínio na produtividade de ciclos posteriores. Essa necessidade periódica de reposição dos nutrientes removidos é denominada Lei da Restituição.

Tabela 1. Quantidades de nutrientes extraídas e exportadas pela cultura da soja em função das expectativas de produtividade.

Nutrientes extraídos	Total extraído
N (kg/100 t ⁻¹)	143
P (kg/100 t ⁻¹)	19
K (kg/100 t ⁻¹)	174
Ca (kg/100 t ⁻¹)	87
Mg (kg/100 t ⁻¹)	49
S (kg/100 t ⁻¹)	44
B (g/100 t ⁻¹)	235
Cu (g/100 t ⁻¹)	339
Fe (g/100 t ⁻¹)	7.318
Mn (g/100 t ⁻¹)	2.470
Zn (g/100 t ⁻¹)	592

Fonte: Orlando Filho (1983).

2.2 Lei do Mínimo ou de Liebig

A otimização da produtividade das culturas só será possível com adequada disponibilidade de todos os macros e micronutrientes do solo. Caso contrário, a produção será invariavelmente limitada pelo elemento essencial que se encontra em menor disponibilidade no solo.

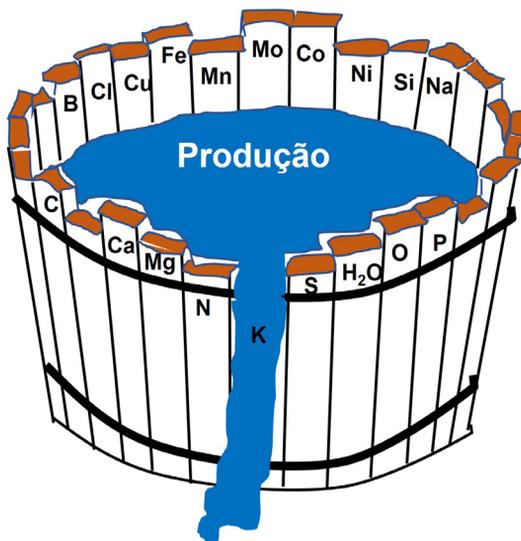
A Lei do Mínimo, também conhecida como lei de Liebig, foi enunciada em 1862. Relaciona o crescimento vegetal com a quantidade do elemento existente no solo. Segundo ela, o crescimento de uma planta está limitado por aquele nutriente que se encontra em menor proporção no solo, em relação à necessidade das plantas.

Do ponto de vista prático a aplicabilidade dessa lei é complexa, porque em condições normais de campo, muitas vezes são vários os nutrientes ou fatores que limitam a produção, além da ação de suas interações.

Em sistemas altamente produtivos, o conhecimento da Lei do Mínimo é determinante para o sucesso do empreendimento.

Essa lei tem sido também ilustrada, tradicionalmente, por um barril, tendo algumas tábuas com diferentes alturas, sendo a tábua com a menor altura a que representa o nutriente mais limitante. O aumento dessa tábua permitirá aumentar o nível de líquido no barril até o limite de outra tábua, agora a de menor altura. No exemplo da Figura 4, se a deficiência de N for corrigida, o fator mais limitante passará a ser o K.

Figura 4. Representação esquemática da Lei do Mínimo.



Fonte: Lopes (1998).

Portanto, quando se pensa em adubação, deve-se pensar em equilíbrio entre os nutrientes. Não adianta gastar fortunas com NPK, se as quantidades de magnésio, ou enxofre, são baixas no solo. Conforme ilustra a figura 4, as maiores produtividades do milho ocorreram nas maiores doses de N e K, indicando que a aplicação de

um nutriente é potencializada quando o outro se encontra em níveis adequados. Por outro lado, nas maiores doses de K e combinado com as menores doses de N, houve decréscimo na produtividade.

2.3 Lei dos incrementos decrescentes

Em 1909, o alemão E. A. Mitscherlich, tomando como base uma série de ensaios, desenvolveu uma equação relacionando o crescimento de plantas ao suprimento de nutrientes (Tisdale & Nelson, 1975). Matematicamente a Lei é expressa pela seguinte expressão:

$$\log (A - Y) = \log A - c (X + b)$$

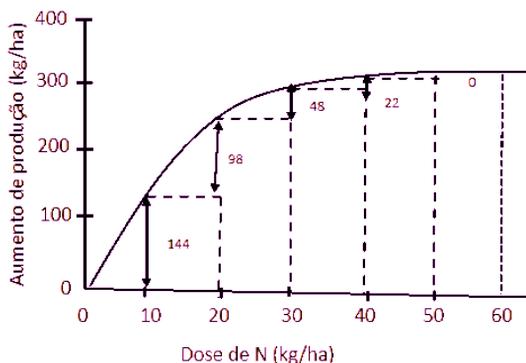
onde, Y é a produção obtida; A é a produção máxima esperada em resposta ao nutriente X colocado à disposição da planta (ou outro fator de produção, como luz, temperatura etc.); c é uma constante de proporcionalidade ou “coeficiente de eficácia”, e b é a quantidade do mesmo nutriente já existente no solo.

A Lei dos Incrementos Decrescentes afirma que à medida que se enriquece o solo por meio da adubação, não são observados ganhos proporcionais e correspondentes aos incrementos de nutrientes minerais fornecidos pelos fertilizantes. Na prática o que se observa são elevadas respostas iniciais das culturas ao fornecimento de nutrientes, porém, havendo, a partir de determinado ponto, ganhos em produção decrescentes com os incrementos dos fertilizantes (Figura 5).

Essa lei é de grande importância prática para o manejo da fertilidade do solo em sistemas agrícolas, uma vez que os gastos aumentam linearmente em função das doses de fertilizantes e não se terá uma resposta linear em produtividade. Assim, se pode buscar uma produtividade ótima economicamente viável ou produtividade

máxima econômica, a qual normalmente se situa entre 80-90% da produtividade física. Em outras palavras, no manejo da adubação, seguindo os princípios desta lei, se recomendam quantidades de fertilizantes que possam proporcionar de 80-90% da produtividade máxima esperada.

Figura 5. Curva de resposta hipotética de uma determinada cultura a doses de N, evidenciando os incrementos de produção para cada 10 kg/ha.

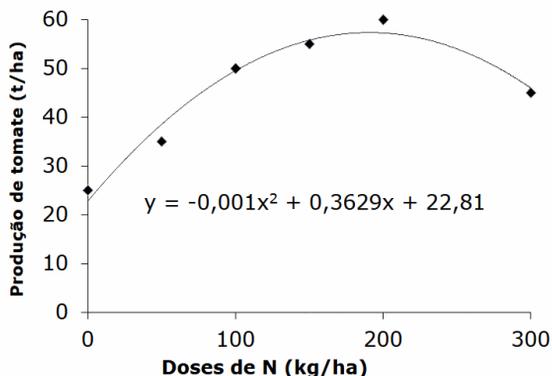


Fonte: autoria própria.

2.4 Lei do Máximo

Qualquer fator de produção, quando em excesso, tende a não aumentá-la ou mesmo a diminuí-la. No caso dos nutrientes, o decréscimo da produção pode ser provocado pelo efeito tóxico do elemento ou pelos desbalanceamentos entre os nutrientes (Figura 6).

Figura 6. Exemplo da Lei do Máximo aplicada a produção de tomate em função de doses de nitrogênio.



Fonte: Autoria própria.

EXERCÍCIOS

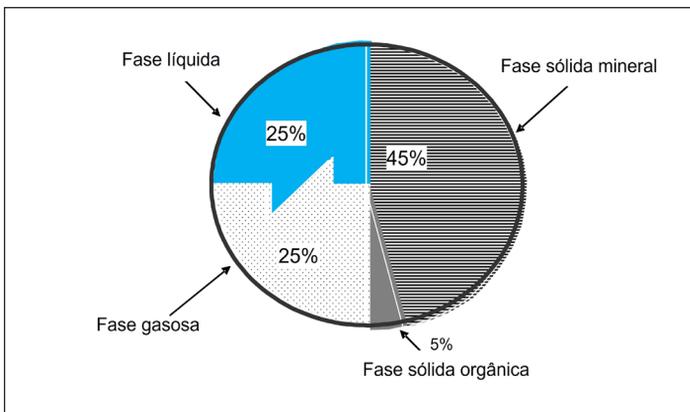
1. Explique como o uso racional de fertilizantes pode contribuir com a conservação dos recursos naturais.
2. Quais as diferenças entre solos produtivos e solos férteis?
3. Estabeleça uma relação entre os fatores de formação com a fertilidade do solo.
4. Como a Lei do Mínimo e a Lei dos incrementos não-proporcionais (incrementos decrescentes) podem ser empregadas para otimizar a produtividade e rentabilidade das culturas?
5. Elabore um gráfico ilustrando a Lei dos Incrementos decrescentes e explique sucintamente como ela se relaciona com o uso racional de fertilizantes na agricultura.
6. Os solos do semiárido nordestino são férteis? Explique.

3

AS FASES DO SOLO

O sistema sola-planta é constituído por três fases: a fase sólida, a fase líquida e a fase gasosa (Figura 7). Apesar da fase gasosa também ser importante para o desenvolvimento das plantas, (a absorção iônica, por exemplo, é influenciada pelo teor de O_2 no meio), será dada maior ênfase às fase sólida e líquida.

Figura 7. As fases do solo e suas proporções relativas considerando um solo hipotético.



Fonte: Autoria própria.

A fase sólida é composta pela fração mineral e orgânica e a líquida, pela solução. do solo. Em cada uma destas fases e, principalmente, na interface ocorrem reações que favorecem (ou limitam) o crescimento vegetal.

3.1 Fase sólida: Composição e características

A fase sólida é proveniente dos materiais derivados das rochas e/ou sedimentos, associados aos compostos de origem orgânica. A constituição química das rochas ou sedimentos é variável em função de sua origem e natureza, afetando as características do solo formado. Esta influência tende a se reduzir na medida em que o intemperismo atua, podendo levar solos derivados de materiais de origem diferentes a apresentarem feições e composição química similares.

A fase sólida é constituída de agregados que se apresentam, até certo ponto, individualizados. Os agregados são formados de partículas unitárias, cimentadas entre si por matéria orgânica, óxidos de Fe e Al, sílica, entre outros. As partículas individuais são obtidas após a dispersão dos agregados. Limites de tamanho definem as partículas como pertencentes a diferentes frações. Esses limites são estabelecidos pela classificação de Atterberg ou classificação internacional (Tabela 2).

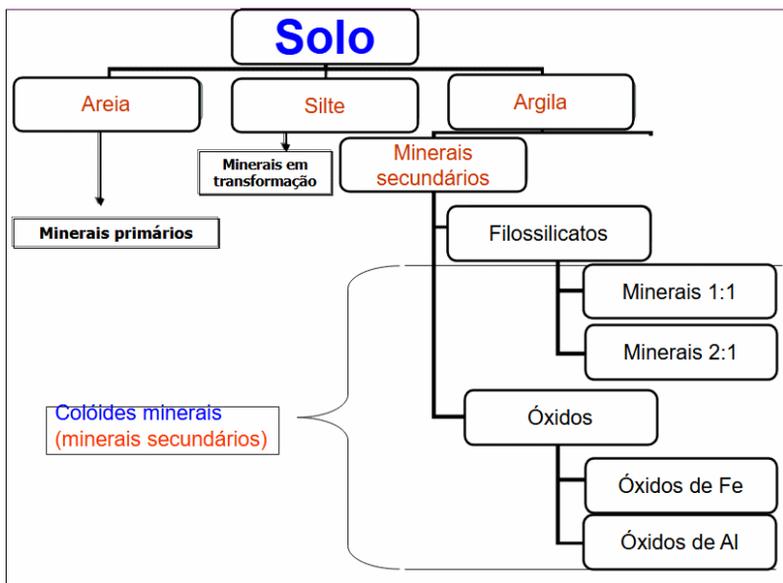
Tabela 2. Frações granulométricas do solo.

Areia	Silte	Areia fina	Areia grossa	Cascalho
..... mm				
≤ 0,002	0,002 - 0,05	0,05 – 0,2	0,2 - 2,0	> 2

A fração areia pode conter minerais primários, originados do material de origem do solo, no caso dos solos pouco intemperizados. Com o avanço do intemperismo, apenas o quartzo se

mantém nesta fração (Figura 8). Os minerais de menor resistência ao intemperismo, como os feldspatos, piroxênios, olivinas e biotita, se decompõem e são transformados em minerais secundários. Na fração grosseira podem ser também encontrados nódulos e concreções formados pedogeneticamente pela cimentação por óxidos de ferro presentes nas frações mais finas.

Figura 8. Composição da fase sólida do solo.



A fração silte é composta por fragmentos de minerais do material de origem e/ou microagregados formados por partículas de argila cimentadas. Nos solos altamente intemperizados, predomina a segunda situação, sendo frequentemente observados teores significativos de silte da análise textural. Isto se deve à forte estabilidade dos microagregados, impossibilitando aos procedimentos de dispersão na análise textural uma perfeita separação das frações.

A fração argila é composta por minerais secundários originados do intemperismo dos minerais primários. O processo de formação dos minerais secundários se dá pelo rompimento da rede cristalina destes e pela remoção dos íons pela água que atravessa as fraturas nas rochas. Em condições de intemperismo pouco acentuado, quando a remoção de cátions e sílica não é muito drástica, formam-se os minerais de argila silicatados do tipo 2:1. O ferro contido nos minerais primários pode se precipitar como óxido/hidróxido. O avanço do intemperismo proporciona progressiva perda de cátions e sílica, desestabilizando os minerais 2:1 e favorecendo a formação das argilas 1:1 (Figura 8).

A transformação de minerais 2:1 em 1:1 também depende das condições locais de drenagem e da razão remoção/acumulação dos produtos de decomposição, podendo ocorrer reversão desse processo em locais de acúmulo, como depressões e áreas mal drenadas.

No final do intemperismo ocorrem condições favoráveis à transformação das argilas 1:1 em hidróxidos de alumínio (gibbsita). Solos em estágio de intemperismo avançado são predominantemente oxidícos, como alguns Latossolos, nos quais se verifica uma concentração relativamente elevada dos óxidos de ferro e alumínio devido à remoção dos demais elementos pelo intemperismo. Certas condições de intemperismo podem levar os minerais primários diretamente ao último estágio de intemperismo, a gibbsita. Isto se verifica em condições de lixiviação elevadas, como no caso de regiões tropicais.

A argila é a fração mais importante do solo em termos de reatividade e interações com os demais constituintes sólidos devido à sua elevada superfície específica. Suas propriedades físicas e químicas, como a retenção de umidade, capacidade de troca iônica e as propriedades como a friabilidade, plasticidade e pegajosidade são derivadas de sua natureza coloidal.

Sistema coloidal do solo

O solo pode ser considerado um sistema disperso, pois é constituído de mais de uma fase, sendo que a fase sólida está em estado de acentuada subdivisão. Há, portanto, um sistema coloidal no solo, constituído de partículas diminutas, de tamanho coloidal (inferior a 2 μm), de natureza mineral ou orgânica, ou organo-minerais, como fase dispersa na solução (ou no ar) do solo. Nesse sistema ocorrem reações químicas, físico-químicas e microbiológicas de extrema importância no estudo dos solos. Neste tamanho, os materiais adquirem propriedades particulares, relacionadas ao aumento relativo da superfície específica e ao pequeno tamanho das partículas.

Superfície específica

O termo ‘superfície específica’ refere-se à área por unidade de massa do material considerado (solo como um todo, fração argila apenas, matéria orgânica etc.), usualmente, expressa em metros quadrados por grama ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), possibilita inferir sobre o grau de reatividade do solo. Deve-se esperar grandes variações entre solos quanto às suas superfícies específicas.

Entre os fatores responsáveis por essas variações, encontram-se:

- Textura ou granulometria;
- Tipos de minerais de argila;
- Teor de matéria orgânica.

Em virtude do menor tamanho da fração argila do solo, em relação às outras frações, pode-se deduzir que esta fração, de natureza coloidal, contribui em maior proporção com o valor da superfície específica do solo.

Quanto ao tipo de mineral de argila presente, sabe-se, por exemplo, que a caulinita apresenta superfície específica de 10 a 30 m²/g, os óxidos de Fe de 100 a 400 m²/g, e a montmorilonita, de 700 a 800 m²/g. É de se esperar, portanto, que solos tropicais, que têm nos óxidos e na caulinita os principais constituintes da fração argila, tenham menor superfície específica, em geral, que solos de regiões temperadas, onde há predominância de montmorilonita e de outras argilas silicatadas mais reativas (2:1).

3.2 Origem das cargas elétricas do solo

3.2.1 Importância

As cargas elétricas geradas na fase sólida do solo são fundamentais para a manutenção de sua fertilidade e qualidade. As cargas elétricas negativas são responsáveis pela capacidade de troca de cátions (CTC) e positivas pela capacidade de troca ânions (CTA). Embora o fenômeno de CTC seja mais expressivo nos solos, ambas as cargas são fundamentais para a manutenção da vida no planeta porque retêm os nutrientes de plantas no solo evitando sua lixiviação e contaminação do ambiente.

As cargas elétricas podem ser de dois tipos:

- a. *Cargas elétricas permanentes*
- b. *Cargas elétricas variáveis ou dependentes pH*

a) *Cargas permanentes:*

- São sempre negativas (com raras exceções)
- Não variam com o pH do solo
- São originadas em minerais 2:1 por substituição isomórfica

A substituição isomórfica ocorre em minerais primários e secundários 2:1, devido à similaridade dos raios iônicos de alguns elementos químicos constituintes destes minerais, notadamente Si, Al, Mg e Fe (Tabela 3).

Tabela. Raio iônico de alguns elementos químicos

Elemento	Raio iônico (nm)
Si ⁴⁺	0,41
Al ³⁺	0,50
Fe ³⁺	0,64
Mg ²⁺	0,65
Zn ²⁺	0,70
Fe ²⁺	0,75
Ca ²⁺	0,94
Na ⁺	0,98
K ⁺	1,33
O ⁻²	1,45
1 nm = 10 ⁻⁹ m	

Fonte: McBride (1991)

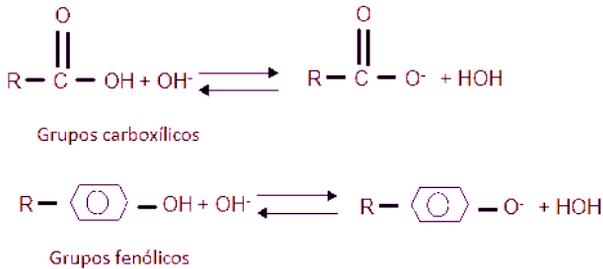
b) Cargas elétricas dependentes de pH

- Podem ser positivas ou negativas
- Ocorrem principalmente em solos altamente intemperizados
- Ocorrem na matéria orgânica do solo, minerais 1:1 (caulinita) e na superfície de óxidos de Fe e Al.

b.1) Superfície de óxidos de Fe e Al

Nas superfícies com hidroxila exposta, dos óxidos de ferro e alumínio os íons H⁺ do solo (sob acidez) protonam estas hidroxilas gerando cargas positiva. Sob pH elevado os íons OH⁻ do solo

Figura 10. Geração de cargas negativas em grupos funcionais da matéria orgânica do solo.

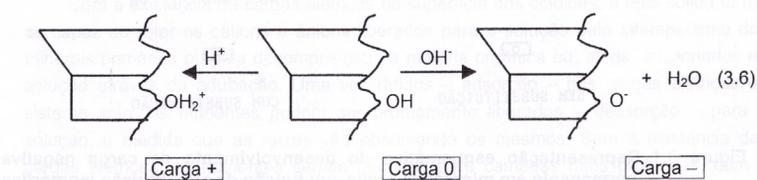


Fonte: Furtini Neto et al. (2001).

b.3) Arestas quebradas de minerais 1:1

Devido às imperfeições dos minerais 1:1 como a caulinita, como fraturas e, ou, quebras, estes minerais expõem superfícies hidroxiladas. Tal como ocorre nos óxidos de Fe e Al, nas superfícies com hidroxila exposta os íons H^+ do solo (sob acidez) protonam estas hidroxilas gerando cargas positiva. Sob pH elevado os íons OH^- do solo (sob alcalinidade) dissociam a hidroxila do mineral gerando carga negativa e formando uma molécula de água.

Figura 11. Representação esquemática do desenvolvimento de cargas positivas e negativas variáveis em caulinita.



Fonte Furtini Neto et al. (2001).

Tabela 4. Capacidade de troca de cátions de alguns minerais do solo em comparação com a matéria orgânica.

Componente	Tipo de mineral	Carga da camada	CTC ($c_{mol} Ckg^{-1}$)	ASE ($m^2 g^{-1}$)
Mica	2:1	1,0	20-40	70-120
Vermiculita	2:1	0,6-0,9	120-100	600-800
Montmorilonita	2:1	0,25-0,6	80-120	600-800
Clorita	2:1:1	» 1	20-40	70-150
Caulinita	1:1	» 0	1-10	10-20
Matéria orgânica	-	-	200-300	-

Fonte: Adaptado de Mello et al. (1983). ASE = área superficial específica

3.2.2 Características da CTC

- *Estequiométrica:* uma carga negativa é neutralizada por outra positiva na proporção de 1:1. Assim, $1,0 \text{ cmol}_c$ de K^+ neutraliza $1,0 \text{ cmol}_c$ de carga negativa e, portanto, 1 cmol_c de Ca^{2+} equivalem a $2,0 \text{ cmol}_c$ de K^+ em termos de capacidade de neutralização de carga negativa.
- *Reversível:* Os íons da CTC podem ser trocados por outros da solução do solo obedecendo o princípio estequiométrico.
- *Processo rápido:* Em laboratório geralmente uma agitação do solo por cinco minutos adicionado de um cátion deslocante (geralmente K) é suficiente para promover o deslocamento dos cátions da fase sólida para a solução do solo, enquanto a fase sólida fica saturada com íons K.

3.2.3 Índices associados com a CTC do solo

Os índices abaixo listados normalmente são utilizados como referência para se inferir sobre o grau de fertilidade do solo.

Contudo, deve-se ter em mente que um único índice isolado não é suficiente para saber se um solo é fértil ou não. Atualmente, busca-se avaliar os atributos químicos, físicos e biológicos para conhecer melhor a capacidade produtiva do solo.

1. Soma de Bases

$$SB = Ca + Mg + K + Na;$$

2. CTC efetiva

$$t = Ca + Mg + K + Al;$$

3. CTC potencial ou CTC pH 7,0

$$T = Ca + Mg + K + Na + (H + Al);$$

4. Saturação por bases

$$V\% = (SB/T) \times 100;$$

5. Saturação por Al

$$m\% = (Al/t) \times 100;$$

6. Saturação de K

$$K\% = (K/T) \times 100;$$

7. Saturação de Ca

$$Ca\% = (Ca/T) \times 100;$$

8. Saturação de Mg

$$Mg\% = (Mg/T) \times 100$$

9. Percentagem de Na trocável

$$PST = (Na/T) \times 100$$

Exemplo de aplicação

Suponha a seguinte análise de solo

$$pH_{CaCl_2} = 4,5$$

$$P = 2,6 \text{ mg dm}^{-3}$$

$$Na^+ = 0,04 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$$

$$K^+ = 0,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$$

$$Ca^{2+} = 1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$$

$$Mg^{2+} = 0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$$

$$H + Al = 4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$$

$$Al^{3+} = 1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$$

Calcule os valores de SB, t, T, V%, m% e PST

A tabela abaixo, extraída de Furtini Neto *et al* (2001) fornece uma referência para os valores de saturação para Ca, Mg e K na CTC efetiva.

Tabela 5. Proporções ideais na CTC efetiva para as bases trocáveis.

Base	Faixa adequada (%)
Ca ²⁺	60 - 70
Mg ²⁺	10 - 20
K ⁺	2 - 5

O valor t também é referido como CTC a pH natural. Esta distinção da CTC a pH 7,0 é decorrente do fato dos íons H⁺ estarem ligados de forma covalente na fase sólida do solo e são liberados desta fase apenas quando o solo atinge pH 7,0 ou superior, liberando, desta forma, a carga negativa.

3.3 Fase líquida

A fase líquida do solo constitui uma solução que permeia os poros, interagindo com as fases sólida e gasosa. O termo **solução do solo** é empregado porque, de fato, a porção aquosa do solo é uma complexa solução química, onde água é naturalmente o solvente e nela vários tipos de partículas e moléculas orgânicas e minerais estão dissolvidas (Tabela 6).

Os principais íons presentes na solução do solo, com pH próximo a neutralidade são:

- *Cátions trocáveis*: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , H^+ , Al^{3+} seus teores são facilmente alterados pelo manejo do solo, no caso do Al em solos acidificados o Al^{3+} poderá ser fitotóxico e em solos corrigidos com calcário os teores de Ca e Mg serão altos.
- *Ânions*: NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} apresenta-se em menores teores que os cátions trocáveis, entretanto podem estar presentes em solos com grande quantidade de matéria orgânica, o excesso de NO_3^- é um exemplo.

Tabela 6. Concentração de alguns íons na solução do solo de um Latossolo Vermelho distrófico típico do Estado do Rio Grande do Sul.

Íons	Concentração (mmolL-1)
Ca^{2+}	70
Mg^{2+}	47
K^+	96
Na	14
NH_4^+	71
Al^{3+}	15
NO_3^-	464
SO_4^{2-}	12
H_2PO_4	16
Zn^{2+}	6
Cu^{2+}	2
AsO_4^{-2}	-
Ni^{2+}	-
Cd^{2+}	-
Pb^{2+}	-
Substâncias orgânicas	-

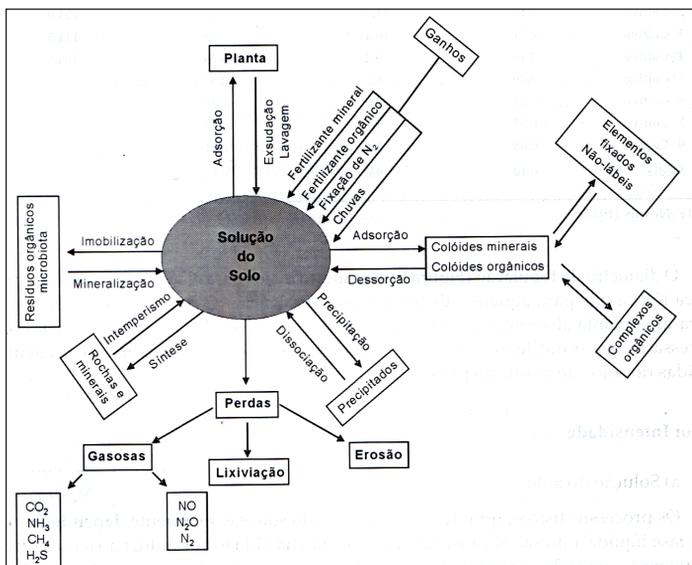
Fonte: Meurer (2006)

A composição da solução do solo depende de uma série de fatores, dentre os mais importantes, estão:

- Material de origem;
- Adição de produtos;
- pH;
- Disponibilidade de O_2 .

Quase todas as reações químicas que ocorrem no solo são mediadas ou ocorrem em sua solução, dentre as quais se podem destacar as reações de hidrólise, oxirredução e complexação. Assim, para o adequado manejo da fertilidade do solo, se torna de suma importância a compreensão da fase líquida do solo, como se dá o transporte de nutrientes na solução até a planta, além da inferência da solubilidade de nutrientes nesta fase do solo (Figura 12).

Figura 12. Interação da fase líquida (solução) com as demais fases do solo.



Fonte: Novais et al. (2007)

3.4 Fase gasosa

O ar do solo ocupa principalmente os macroporos. Sua composição é semelhante ao do ar atmosférico (Tabela 7), diferenciando apenas na concentração dos gases que os constituem.

Tabela 7. Concentrações ideais de gases na atmosfera do solo.

Ambiente	N ₂	O ₂	CO ₂
Atmosfera	78%	21%	0,03%
Solo	78%	20,08%	0,25%

Essa diferenciação nos teores dos gases ocorre porque, em primeiro lugar, as raízes e organismos que vivem no solo necessitam respirar. Neste processo, eles consomem o oxigênio (O₂) e liberam gás carbônico (CO₂), aumentando os teores de CO₂ e diminuindo os teores de O₂. No solo os teores de CO₂ ficam próximos a 1% enquanto que na atmosfera é de 0,03%. Em segundo lugar, a difusão do ar no solo é dificultada porque os poros são tortuosos e descontínuos. Quando estamos em uma sala fechada e abrimos a porta e a janela, o ar atmosférico dentro da sala é rapidamente renovado. No solo também existe essa difusão e renovação do ar, porém isso não é instantâneo, e ocorre em um tempo maior.

É importante frisar que a boa aeração do solo é importante para a produção agrícola e o crescimento das plantas em geral, pois sem ar as raízes não conseguem respirar e podem morrer, causando danos e perdas no desenvolvimento vegetal. Um solo que permaneça muito tempo com excesso de água pode causar problemas de aeração para as raízes. Se a aeração for deficiente no solo, os organismos vão competir com as raízes, o que também pode causar danos à produção agrícola.

Quando a concentração de CO₂ for maior que 5% ou a concentração de O₂ menor do que 15%, há riscos de redução do

crescimento das raízes e da parte aérea, sendo o limite crítico superior a 10% de CO₂.

As atividades agrícolas que prejudicam a boa aeração do solo são normalmente as que causam compactação, contração, secagem, expansão, dispersão e agregação das partículas do solo, são elas:

- Tráfego intenso de máquinas e implementos agrícolas sobre o solo;
- Pisoteio de animais em sistemas intensivos de criação;
- Uso de água salobras para irrigação, a qual saliniza o solo e provoca desagregação e compactação das partículas.

A diminuição da aeração (Tabela 8) do solo provoca uma série de prejuízos para as plantas e todos os organismos que habitam o solo, dentre eles, estão:

- Toxidez de elementos químicos;
- Perdas de nutrientes;
- Diminuição da taxa de decomposição da M.O.;
- Poluição ambiental.

Tabela 8. Compostos envolvidos nos processos de redução do solo, como consequência da diminuição da concentração de O₂.

Potencial Redox (mV)	Reações
+600 a +400	$\frac{1}{2} O_2 + 2e \Rightarrow H_2O$
+500 a +200	$NO_3^- + 2H^+ + 2e \Rightarrow \frac{1}{2} NO_2 + H_2O$
+400 a +200	$MnO_2 + 4H^+ + 2e \Rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$
+300 a +100	$FeOOH + 3H^+ + e \Rightarrow Fe^{2+} + 2H_2O$
0 a -150	$SO_4^{-2} + 9H^+ + 6e \Rightarrow HS^- + 4H_2O$
-150 a -220	$H^+ + e \Rightarrow \frac{1}{2} H_2$
-150 a -220	$CH_2On \Rightarrow n/2 CO_2 + n/2 CH_4$

Fonte: Bonh *et al.* (1985) citado por Meurer (2006).

É importante destacar, como visto na tabela 8, que a diminuição da disponibilidade de oxigênio, mesmo que pequena, provoca a redução do nitrato (NO_3^-) a forma gasosa (NO_2) provocando a perda deste nutriente por volatilização, diminuindo seu aproveitamento pelos vegetais. Outro ponto é a redução do Mn^{3+} a Mn^{2+} , o mesmo acontece com o Fe^{3+} a Fe^{2+} , sendo o Mn^{2+} e o Fe^{2+} muito mais solúveis e as formas absorvidas pelas plantas. No entanto, os micronutrientes são menos requeridos e sua maior disponibilidade pode ser tóxica.

Existem algumas práticas de recuperação da aeração do solo, de modo que podem ser usadas para tornar áreas improdutivas novamente produtivas ou na recuperação de áreas degradadas e destinadas a preservação ambiental, são exemplos:

- Correção do pH do solo através da calagem;
- Aração do solo;
- Correção da salinidade do solo;
- Aporte de resíduos orgânicos;
- Uso de gramíneas.

Assim, para o correto manejo da fertilidade do solo, visando a obtenção de rendimentos financeiros satisfatórios com a produção agrícola e a sustentabilidade dos ecossistemas, fundamentalmente deve abranger os conhecimentos sobre a atmosfera que compõem o solo e as suas interações com as outras fases.

3.5 Transporte de nutrientes para as raízes

A princípio, para que os nutrientes de plantas sejam absorvidos, é necessário que os mesmos atinjam o sistema radicular das plantas. São três os processos responsáveis pelo transporte de nutrientes até as raízes, são eles: interceptação radicular, fluxo de massa e difusão (Figura 13).

A **interceptação radicular** ocorre na medida em que as raízes crescem e entram em contato com os nutrientes dissolvidos na solução do solo. No entanto, esse processo contribui com um pequeno percentual dos nutrientes absorvidos pelas plantas (0,2 a 4%). Além disso, o nutriente para ser absorvido deve necessariamente estar dissolvido na solução do solo.

O **fluxo de massa**, por sua vez, é o processo de transporte que contribui com a maioria dos nutrientes absorvidos. O nutriente chega até as raízes sendo carregado pelo fluxo em massa das moléculas da solução do solo, que obedecem a um gradiente de potencial hídrico gerado pela transpiração das plantas. Além disso, o fluxo de massa ocorre de forma bastante rápida e a quantidade de nutrientes absorvidos é proporcional ao volume de água que chega até as raízes. Isso implica que para a adequada nutrição das plantas, o teor de água no solo deve estar adequado.

Vale salientar que para o transporte de elementos pouco móveis no solo, como P e K, o fluxo de massa contribui muito pouco ou quase nada. Normalmente esses nutrientes são transportados em quantidades adequadas pelo terceiro processo, a **difusão**.

A **difusão** de nutrientes no solo ocorre como resultado do gradiente de concentração gerado entre as raízes e solução do solo. Esse processo é demasiadamente lento e normalmente ocorre a pequenas distâncias (< 10 mm). Isso implica que para satisfazer as quantidades ideais de nutrientes pouco móveis e que dependem desse processo para chegar até as raízes, os fertilizantes devem ser aplicados próximos ao sistema radicular das plantas.

A difusão obedece a Lei de Fick (1855), a qual pode ser expressa pela seguinte equação:

$$D = D_i \times (dc/dx)$$

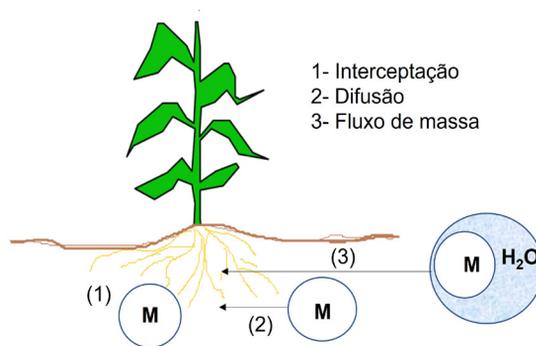
Em que:

D = taxa de difusão ($\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$);

D_i = coeficiente de difusão ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$);

dc/dx = gradiente de concentração ($\text{mol cm}^{-3} \text{ água cm}^{-1}$).

Figura 13. Mecanismos de contato íon –raiz. Fonte: Adaptado de Malavolta *et al.* (1997).



EXERCÍCIOS

A. Questões sobre a composição do solo

1. Sobre a composição do solo é correto afirmar que:
 - a) Nem todos os solos têm porosidade
 - b) Num solo saturado a matéria orgânica é praticamente inexistente
 - c) A maioria dos solos têm cerca de 5% de matéria orgânica
 - d) Num solo ideal as proporções entre macro e microporos são semelhantes
2. Sobre a fração areia é correto afirmar que:
 - a) Em todos os solos a areia é uma reserva de nutrientes para as plantas
 - b) Em solos muito intemperizados a fração areia é constituída principalmente por minerais de fácil intemperização

- c) Em solos muito intemperizados a fração areia é constituída principalmente pelo quartzo
- d) Solos mais intemperizados tendem a ser mais arenosos
3. A fração argila é a mais reativa no solo, contribuindo para a formação das unidades estruturais devido:
- a) Sua baixa CTC
 - b) Elevada superfície específica
 - c) Alta capacidade de retenção de ânions
 - d) Ao seu formato cilíndrico
4. Em relação à composição da fase sólida mineral do solo é correto afirmar que:
- a) Os minerais primários são formados no solo
 - b) Os minerais 1:1 e Óxidos estão em maior concentração em solos jovens
 - c) Os minerais 2:1 estão em maior concentração em solos pouco intemperizados.
 - d) Os solos do semiárido, em geral, são mais intemperizados e, portanto, mais ricos em minerais 1:1.
5. Sobre a origem das cargas elétricas do solo é correto afirmar que:
- a) As cargas permanentes podem ser positivas ou negativas
 - b) A substituição isomórfica ocorre em minerais 1:1 e óxidos.
 - c) Apenas minerais silicatados 2:1 geram cargas negativas permanentes
 - d) A matéria orgânica é o componente que mais contribui na geração de cargas dependentes de pH em solos jovens
6. A CTC do solo é determinada pelas características de sua fase sólida, exceto:
- a) Superfície específica
 - b) Teor de argila
 - c) Tipo de argila
 - d) Teor de matéria orgânica
 - e) Presença de minerais secundários

7. São características da CTC, exceto:
 - a) Processo eletrostático
 - b) Processo dinâmico e reversível
 - c) Estequiométrico
 - d) Aumenta a lixiviação de cátions
 - e) Aumenta a lixiviação de ânions

8. Em relação às cargas elétricas do solo, é correto afirmar que:
 - a) No PCZ (Ponto de Carga Zero) os minerais 2:1, 1:1 e óxidos não desenvolvem cargas elétricas
 - b) Quando o pH do solo encontra-se acima do PCZ, os minerais de carga variável (dependente) desenvolvem carga positiva.
 - c) O aumento do pH solo aumenta a densidade de cargas permanentes do solo.
 - d) Horizontes superficiais de intemperizados, ricos em matéria orgânica, sempre apresentam excesso de carga negativa.

9. A CTC é fundamental para a qualidade do solo devido sua participação nos seguintes processos, exceto:
 - a) Retenção de nutrientes para as plantas
 - b) Diminuição da poluição por lixiviação de cátions
 - c) Diminuição da poluição por lixiviação de ânions
 - d) Retenção de matéria orgânica no solo

10. Os processos abaixo listados adicionam substâncias à solução do solo, com exceção de:
 - a) Dessorção
 - b) Precipitação
 - c) Mineralização
 - d) Intemperismo
 - e) Dissociação

B. Questões sobre CTC

I. A análise de um solo resultou nos seguintes resultados:

$\text{pHCaCl}_2 = 4,5$; $\text{P} = 2,6 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Na}^+ = 0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{K}^+ = 0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} = 1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} = 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{H} + \text{Al} = 5,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Al}^{3+} = 1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

- Qual o valor correto da soma de bases:
 - $1,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - $19,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - $3,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - $2,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
- Considerando o resultado da análise descrita, a CTC do solo é:
 - $69,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - $6,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - $9,55 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - $7,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
- Os valores corretos da saturação por bases e da saturação por Al, são respectivamente:
 - 41,3% e 28,1%
 - 28,1% e 33,9%
 - 61,5% e 28,1%
 - Nenhuma das alternativas acima
- Os valores de %Ca e %Mg na CTC do solo são respectivamente:
 - 40,7% e 13,6%
 - 20,5% e 61,5%
 - 5,8% e 17,3%
 - 17,3% e 5,8%

5. Caso a referida análise tivesse sido realizada em amostras de solo nunca cultivado, o solo poderia ser considerado:
- a) Eutrófico
 - b) Distrófico
 - c) Alta fertilidade natural
 - d) Nenhuma das alternativas anteriores
6. Em relação à concentração de Na^+ neste solo, é correto afirmar que:
- a) Está em excesso
 - b) Não provocaria problemas físicos ao solo
 - c) A PST é maior que 15%.
 - d) Há possibilidade de adensamento do solo.
7. A capacidade de troca de cátions efetiva é:
- a) $2,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - b) $1,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - c) $3,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - d) $6,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$

II. Considere os seguintes resultados de uma análise de solo:

$\text{Na}^+ = 0,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$; $\text{K}^+ = 0,15 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$; $\text{Ca}^{2+} = 1,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$;
 $\text{Mg}^{2+} = 0,4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$.

8. Sabendo que a CTC do solo é $8,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, o valor da soma H+Al será:
- a) $4,25 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - b) $6,25 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - c) $1,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
 - d) $2,95 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$

9. O valor correto da saturação por bases do solo da questão II é:
- a) 2,37%
 - b) 23,8%
 - c) 25,8%
 - d) 0,24%
10. Se a saturação por alumínio do referido solo (QUESTÃO II) for de 30%, o teor de Al trocável será de:
- a) 2,78 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$
 - b) 0,84 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$
 - c) 0,59 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$
 - d) 1,0 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$

4

ACIDEZ DO SOLO E CALAGEM

Os solos brasileiros, na sua maioria, são ácidos, sobretudo aqueles que possuem vegetação de cerrado. Os solos ácidos são caracterizados pelas baixas concentrações de cálcio e magnésio, elementos diretamente envolvidos no desenvolvimento das raízes, além de elevados valores de alumínio trocável e baixa concentração de fósforo disponível no solo.

4.1 Origem da acidez do solo

A acidez do solo, basicamente, se origina da remoção da cátions básicos do solo – Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ - substituindo-os por cátions ácidos – Al^{3+} , H^+ (Figura 14).

Diversos são os fatores que influenciam o grau de acidez de um solo. A princípio de tudo, o material de origem. Solos originados de rochas matrizes pobres em bases naturalmente serão ácidos, assim como aqueles que tiveram sua origem, mesmo de rochas ricas em bases, de intensos processos de intemperismo. Esta última situação é apresentada por muitos Latossolos ácidos.

Figura 14. Formação de horizontes ácidos pelo processo de intemperismo e lixiviação de bases.



Fonte: autoria própria.

A decomposição da matéria orgânica gera acidez de diversas formas. O CO_2 produzido, em solos com pH acima de 5,2, promove a acidificação, segundo as reações:



A decomposição da M.O também pode acidificar o solo com a liberação NH_4^+ , que pode gerar acidez pela reação de nitrificação, e pelo processo de oxidação do enxofre oriundo dos compostos orgânicos, que por sua vez libera prótons de H^+ no solo.



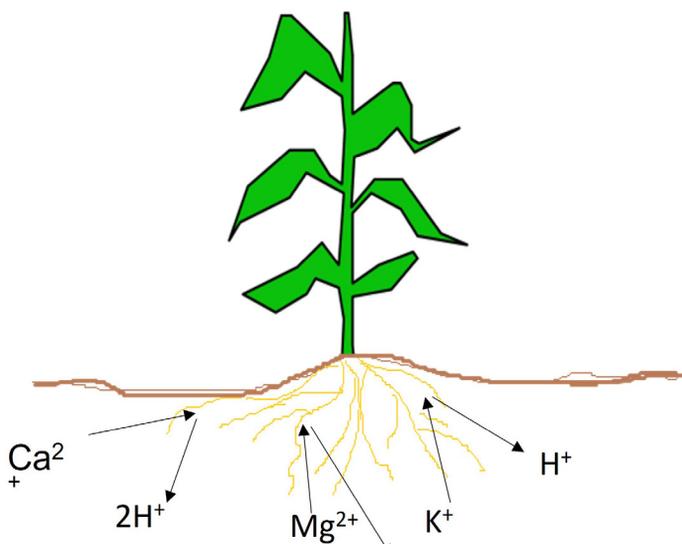
O íon H_3O^+ , denominado hidrônio, é equivalente ao íon H^+ de acordo com o conceito de ácido de Brønsted-Lowry (1923), que segundo o qual, o ácido é uma substância capaz de doar prótons.

As emissões de óxidos de enxofre pelas refinarias de petróleo, termoelétricas, siderúrgicas e outras fontes poluidoras da atmosfera resultam na chuva ácida, representando mais um processo de acidificação. Os óxidos de enxofre e de nitrogênio precipitados podem ser oxidados no solo formando ácidos fortes.

Adição de fertilizantes também pode ser importante na geração de acidez no solo, sobretudo os amoniacais, ou aqueles que liberam NH_4^+ , como no caso da ureia.

Por fim, vale salientar que as próprias plantas podem alterar o pH da sua rizosfera, por meio da exsudação de íons H^+ ou OH^- , a fim de se manter a estequiometria dos processos de absorção de outros cátions e ânions.

Figura 15. Processo de acidificação do solo pela exclusão de íons H^+ pela absorção de cátions.



Fonte: autoria própria

4.2 Componentes da acidez do solo

a) Acidez ativa

A atividade dos íons H^+ dissociados na solução do solo são denominados acidez ativa, que é estimada pelo pH.

Ex. solo com $pH = 5,0$

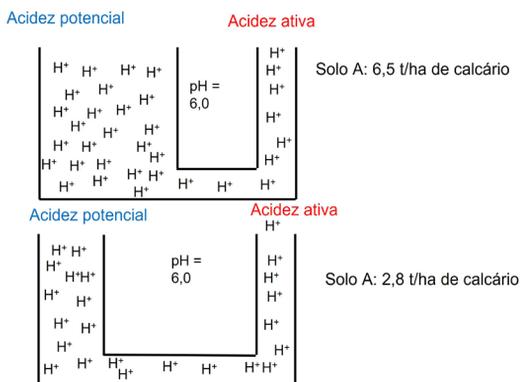
$$5,0 = -\log (H^+)$$

$$(H^+) = 10^{-5} \text{ mol /L de } H^+ = 0,00001 \text{ mol/L}$$

b) Acidez potencial

Os íons H^+ e Al^{3+} , ligados à fase sólida, são denominados acidez potencial. Os íons Al^{3+} podem ser deslocados por outros cátions, sendo, por isso, denominados de Al trocável ou acidez trocável. Os íons H^+ não são trocáveis, uma vez que são ligados à fase sólida por ligação covalente. Em termos de dificuldade de correção, a acidez potencial é considerada mais importante (Figura 16).

Figura 16. Ilustração esquemática da acidez potencial comparativamente a acidez ativa em solos com diferentes capacidade tampão.



A acidez ativa (Tabela 9), embora em baixas concentrações, tem grande influência na disponibilidade de nutrientes no solo. Portanto, se torna de suma importância a sua estimativa para fins agronômicos, sendo comumente feita através da determinação do pH em água ou em CaCl_2 . Todavia alguns laboratórios preferem realizar essa análise com CaCl_2 0,01 mol/L, ao invés de água, mantendo constante a concentrações de sais e evitando a redução do pH pelos sais do solo.

Tabela 9. Classes de interpretação para a acidez ativa do solo (pH)

Classificação química						
Acidez				Neutro	Alcalinidade	
Muito elevada	Elevada	Média	Fraca		Fraca	Elevada
< 4,5	4,5 - 5,0	5,1 - 6,0	6,1 - 6,9	7,0	7,1 - 7,8	> 7,8
(1) pH em água na relação 1:2,5, TFSA						
Classificação agronômica						
Muito baixo		Baixo	Bom	Alto	Muito alto	
<4,5		4,5 - 5,4	5,5 - 6,0	6,1 - 7,0	> 7,0	

Fonte: Alvarez *et al.* (1999).

É relativamente fácil corrigir a acidez ativa, basta alguns quilos de calcário por hectare. Mas à medida que se neutralizam os prótons de H^+ , a fase sólida libera indireta ou diretamente mais para a solução. Os íons H^+ (diretamente) e Al^{3+} (indiretamente) constituem a acidez potencial do solo.

O alumínio é o componente de destaque na acidez dos solos. A princípio, a hidrólise dos cátions de alumínio, deslocados dos sítios de adsorção, libera prótons de H^+ , conforme as seguintes reações:



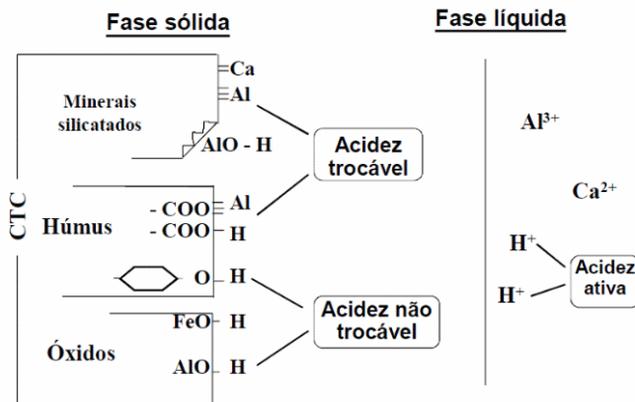
Portanto, o alumínio trocável gera acidez ativa, que existia em potencial. Contudo, é importante salientar que quando se eleva o pH do solo, por meio da calagem por exemplo, o alumínio consome sucessivamente os hidroxilas liberados e precipita-se na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$, até atingir valores de pH acima de aproximadamente 6 unidades, de acordo com a equação.

Além da capacidade de geração de acidez ativa, o alumínio em qualquer uma das formas trocáveis, é altamente fitotóxico, sendo que seu teor no solo representa a parte da acidez potencial ou nociva.

A acidez não trocável é representada pelos prótons de H^+ covalentemente ligados aos coloides. Da alta força da ligação covalente, a ligação dos íons H^+ com os coloides requer alta quantidade de energia para ser desfeita, que pode ser conseguida pela reação de neutralização pelas hidroxilas.

Por fim, a contínua neutralização da acidez não-trocável, até atingir uma faixa entre 6 e 7, traria como benefício agrônômico o aumento da CTC e da faixa de disponibilidade de macro e micronutrientes para as plantas.

Componentes da acidez do solo



4.3 Causa do pouco crescimento das plantas em solos ácidos

Ainda há dificuldade em indicar os efeitos diretos dos prótons de H^+ sobre o crescimento das plantas. Todavia, estudos apontam que em condições de pH do solo abaixo de 4,5, o excesso de H^+ pode deslocar o Ca^{2+} da plasmalema, alterando a sua permeabilidade e reduzindo o crescimento das raízes.

A fim de se aliviar os efeitos fitotóxicos do excesso de H^+ , destaca-se a importância do aumento da concentração de Ca na solução do solo, que é o nutriente mais importante para o crescimento das raízes. A injeção de Ca pode se dá pela própria calagem e, em subsuperfície, pela gessagem.

Altas concentrações de Mn^{2+} também podem proporcionar toxidez às plantas. Essas condições podem ser encontradas em solos com material de origem rico em Mn. Neste caso, semelhante como ocorre com o alumínio, a elevação do pH neutraliza a disponibilidade de Mn^{2+} .

O alumínio, em qualquer estágio de sua hidrólise, apresenta um grande espectro de atuação no metabolismo das plantas. Mais notadamente proporcionando o desenvolvimento de raízes curtas e grossas. Como consequência da baixa proliferação das raízes, há redução na capacidade de absorção de água e nutrientes presentes ao longo do perfil do solo.

O alumínio também pode ser fitotóxico na parte aérea das plantas, com sintomas que podem ser semelhantes aos de deficiência nutricional, notadamente de fósforo e cálcio. A tabela 10 fornece uma lista de culturas com sua respectiva tolerância à saturação de Al.

Tabela 10. Níveis críticos da percentagem da saturação de alumínio no solo para algumas espécies vegetais.

Espécie Vegetal	m (%)	Espécie Vegetal	m (%)
Algodão	10	Cevada	30
Alfafa	15	Trigo	30
Aveia	15	Milho	30
Soja	20	Arroz	45
Feijão	20	Eucalipto	88

Fonte: Neves *et al.* (1982) e Fangeria *et al.* (1988), extraído de Furtini Neto *et al.* (2001).

Além dos efeitos fitotóxicos já mencionados ocasionados pelo alumínio, deve se ressaltar, que por este elemento apresentar elevada capacidade de adsorção aos coloides, o mesmo desloca cátions essenciais às plantas – Ca, Mg e K – dos sítios de adsorção, os quais podem ser perdidos por lixiviação. Assim, a acidez delimita o crescimento das plantas por estar associada a disponibilidade de nutrientes.

A disponibilidade de molibdênio e fósforo em solos ácidos é, normalmente, muito baixa dada a fixação dos ânions molibdato e fosfato, além da baixa atividade biológica dos organismos mineralizadores da matéria orgânica sob condições de acidez.

4.4 Correção da acidez do solo

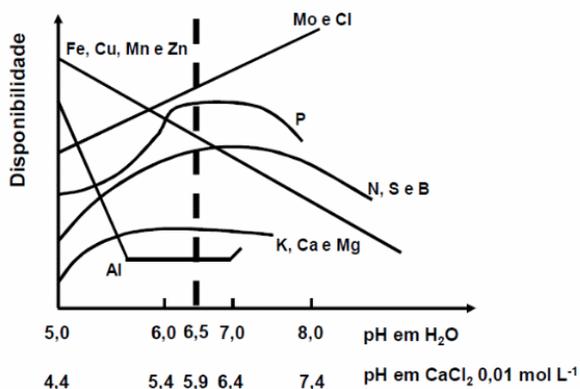
A calagem é a maneira mais fácil, correta e economicamente viável de se corrigir a acidez da camada arável. Dentre os benefícios da calagem, estão:

- Elimina a acidez do solo;
- Fornece cálcio e magnésio;
- Estimula o crescimento radicular (Ca);
- Aumenta a disponibilidade de fósforo;

- Reduz disponibilidade de alumínio e manganês;
- Aumenta a mineralização da matéria orgânica;
- Aumenta a agregação do solo, podendo reduzir a compactação e;
- Aumento da CTC do solo

Como se verifica na figura 17, o condicionamento do solo para obtenção de pH entre 6 e 7, direta e indiretamente, favorece uma boa faixa de disponibilidade da maioria dos nutrientes, o que, obviamente, proporciona maiores produtividades em solos corrigidos.

Figura 17. Influência do pH sobre a disponibilidade de alumínio e nutrientes para as plantas.



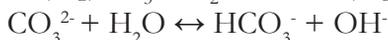
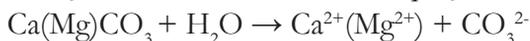
Fonte: Malavolta (1979).

O sucesso da calagem depende basicamente de três aspectos técnicos: das características do corretivo utilizado; da dose utilizada e da forma e época de aplicação. Além dos aspectos técnicos, os econômicos devem ser levados em consideração, como o preço dos corretivos e custos com transporte e aplicação.

4.5 Corretivos da acidez do solo

Os corretivos comumente usados na calagem são óxidos, hidróxidos, carbonatos ou silicatos de cálcio ou magnésio.

O calcário é o corretivo mais indicado e usado na prática da calagem. É obtido através da moagem das rochas calcárias, constituídas por CaCO_3 e MgCO_3 . As reações de solubilização e neutralização ocorrem conforme as equações a seguir:



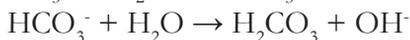
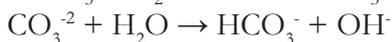
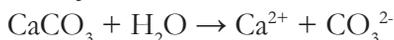
Todo calcário é relativamente rico em cálcio, mas não necessariamente apresenta um teor adequado de magnésio. Assim, os corretivos podem ser classificados pelo teor de MgO (Tabela 11).

Tabela 11. Classificação dos calcários conforme os teores de óxidos de Ca e de Mg.

Calcários	%CaO	%MgO
Calcítico	40 - 45	< 5
Magnésiano	30 - 40	6 - 12
Dolomítico	25 - 30	> 13

Fonte: Furtini Neto *et al.* (2001).

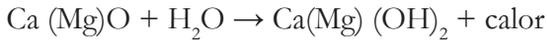
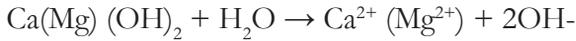
a) Reação do calcário



b) Óxidos

- Principal óxido: cal virgem (CaO)

c) Hidróxidos



d) Escórias de Siderurgia

- Subproduto da indústria do aço.



4.6 Características dos corretivos

- a) Poder de Neutralização (PN): Corresponde a capacidade do corretivo neutralizar os íons H^+ em comparação ao padrão ($\text{CaCO}_3 = 100\%$), sendo considerado a parte química do corretivo. O PN é calculado pela seguinte expressão:

$$\text{PN} = (\% \text{CaO} \times 1,79) + (\% \text{MgO} \times 2,48)$$

onde %CaO e %MgO correspondem às percentagens destes óxidos nos corretivos.

- b) Eficiência Relativa (ER): corresponde a eficiência do corretivo em relação à sua granulometria e sua capacidade de reagir em até três meses, parte física do corretivo. É calculada pela seguinte expressão:

$$\text{ER (\%)} = \text{A} \times 0,2 + \text{B} \times 0,6 + \text{C} \times 1,0$$

A = Percentagem de partículas de 0,84 a 2 mm dividido por 100

B = Percentagem de partículas de 0,3 a 0,84 mm dividido por 100

C = Percentagem de partículas menor que 0,3 mm dividido por 100

- c) Poder relativo de neutralização total (PRNT): Calculado pela seguinte expressão: $PRNT (\%) = (PN \times ER) / 100$

4.7 Métodos para recomendação da necessidade de calagem

a) Método baseado na saturação de bases

$$NC = \frac{(V2 - V1) \times CTC}{PRNT}$$

Onde:

NC = necessidade de calcário em t/ha

V2 = saturação por base desejada para cultura (esperada)

V1 = saturação por base atual do solo

$V1 = \frac{SB}{CTC} \times 100$

CTC potencial = SB + H+Al

b) Método SMP (Shoemaker, McClean, Pratt)

- Baseia-se em adicionar ao solo uma solução padrão com pH conhecido (7,0).
- Preparo de uma suspensão solo + solução padrão (pH = 7,0)
- Agita-se a suspensão e mede-se o pH_{SMP}
- Consultar a tabela 12 para determinar a necessidade de calcário.

Tabela 12. Recomendações de calagem (PRNT = 100%) com base no índice SMP, para correção da acidez dos solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, para aplicação na camada de 0 a 20 cm.

Índice SMP	pH em água a atingir			Índice SMP	pH em água a atingir		
	5,5	6,0	6,5		5,5	6,0	6,5
≤ 4,4	15,0	21,0	29,0	5,8	2,3	4,2	6,3
4,5	12,5	17,3	24,0	5,9	2,0	3,7	5,6
4,6	10,9	15,1	20,0	6,0	1,6	3,2	4,9
4,7	9,6	13,3	17,5	6,1	1,3	2,7	4,3
4,8	8,5	11,9	15,7	6,2	1,0	2,2	3,7
4,9	7,7	10,7	14,2	6,3	0,8	1,8	3,1
5,0	6,6	9,9	13,3	6,4	0,6	1,4	2,6
5,1	6,0	9,1	12,3	6,5	0,4	1,1	2,1
5,2	5,3	8,3	11,3	6,6	0,2	0,8	1,6
5,3	4,8	7,5	10,4	6,7	0,0	0,5	1,2
5,4	4,2	6,8	9,5	6,8	0,0	0,3	0,8
5,5	3,7	6,1	8,6	6,9	0,0	0,0	0,2
5,6	3,2	5,4	7,8	7,0	0,0	0,0	0,2
5,7	2,0	4,8	7,0	7,1	0,0	0,0	0,0

Fonte: COMISSÃO (2004).

c) Método baseado da neutralização da acidez trocável

Objetiva reduzir a concentração de Al^{3+} a $< 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$

Objetiva neutralizar o Al^{3+} trocável

NC (t/ha) = necessidade de calcário

$$NC = f \times Al^{3+}$$

f = fator de calagem (variável: 1,5 a 2,0)

NC = $Al^{3+} \times 1,5$ → solos arenosos e baixo teor de matéria orgânica – M.O)

NC = $Al^{3+} \times 2,0$ → solos de textura média e teor médio de M.O.

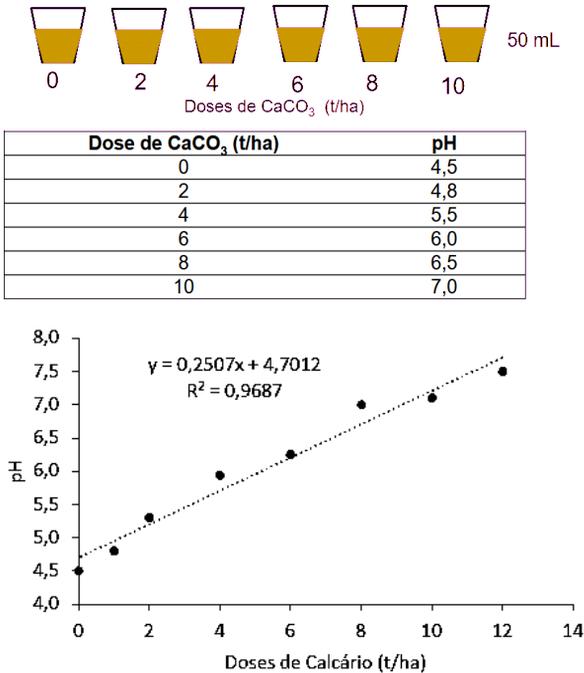
NC = $Al^{3+} \times 2,4$ → solos argilosos e alto teor de M.O.

d) Método da Incubação

- Aplica-se doses crescentes de calcário (CaCO_3);
- Após 10-15 dias mede-se o pH (até o pH estabilizar-se);
- Objetiva estabelecer uma curva pH vs doses de CaCO_3 .

Em posse dos dados da tabela abaixo elabora-se uma função no Excel (Figura 18), a qual será utilizada para a estimativa das doses de CaCO_3 em função do pH desejado.

Figura 18. Variação do pH do solo em função de doses de calcário



$$\text{Dose (t/ha)} = (y - 4,7012)/0,2507$$

$$\text{Se pH} = 6,4; \text{Dose} = (6,4 - 4,7012)/0,2507 = \mathbf{6,6 \text{ t/ha}}$$

e) Método dos teores de Al^{3+} e Ca + Mg trocáveis

$$NC \text{ (t/ha)} = Y [Al^{3+} - (mt. t/100)] + [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

Y = poder tampão do solo dado pela sua textura, podendo ser calculado pela seguinte equação:

$$\hat{Y} = 0,0302 + 0,06532 \times \text{argila} - 0,000257 \times \text{argila}^2 \quad R^2 = 0,99$$

Y = 0,0 – 1,0 (solos arenosos: menos de 15% de argila)

Y = 1,0 – 2,0 (solos de textura média: 16 – 35%)

Y = 2,0 – 3,0 (solos argilosos: 35 – 60% de argila)

Y = 3,0 – 4,0 (solos muito argilosos: mais de 60%)

t = CTC efetiva

mt = saturação por alumínio tolerada pela cultura

X = fator planta quanto ao requerimento de Ca e Mg: varia de 1,0 a 4,0 (Tabela 13).

Tabela 13. Valores máximos de saturação por Al^{3+} tolerados pelas culturas (mt), valores de X para o método do Ale do Ca +Mg trocáveis para algumas culturas e valores de saturação por bases esperada (V_2) com o método de saturação por bases.

Cultura	mt	X	V2
	%	cmol _c dm ⁻³	%
Cereais (milho, trigo, sorgo, arroz)	15-25	2,0	50
Leguminosas (feijão, soja, adubos verdes)	20	2,0	50
Hortaliças (tomate, repolho, alho, ervilha)	5	3,0	60-70
Café	25	3,5	60
Cana-de-açúcar	30	3,5	60
Frutíferas tropicais (mamoceiro, citros, banana, abacaxi)	5-15	2,0 -3,5	60-80
Pastagens de leguminosas	15-25	1,0-2,5	40-60
Pastagens de gramíneas	20-30	1,0-2,5	40-50
Eucalipto	45	1,0	30

Fonte: Adaptado de Alvarez & Ribeiro (1999).

Quantidade de calcário a ser aplicada

$$QC = NC \times SC/100 \times (PF/20) \times 100/PRNT, \text{ t/ha}$$

NC = necessidade de calagem por um dos métodos

SC = percentagem da superfície do terreno a ser coberta na calagem, %;

PF = profundidade de incorporação do calcário, cm;

PRNT = poder relativo de neutralização total do corretivo, %

4.8 Aspectos práticos da calagem

a) Época de aplicação dos calcários

- Calcário comum: 3 a 6 meses antes do plantio
- Calcário calcinado, calcário tipo *filler* e cal virgem (óxidos): 1 mês antes do plantio.
- Cal virgem: ter cuidado com riscos com queima da semente
- Rotação leguminosa-gramíneas: aplicar antes da gramínea, tendo em vista a maior tolerância das gramíneas a acidez.

b) Aplicação dos corretivos

- Distribuição a lanço com máquinas dosadoras
- Gradear - arar- gradear para incorporar o corretivo

c) Aplicação na linha de plantio

- Objetiva fornecer apenas Ca e Mg: aplicar de 150 a 300kg/ha

d) Lavouras perenes já implantadas

- Aplicação a lanço sem incorporação (cobrir a área da copa)

e) Lavouras perenes a serem implantadas

- Aplicação a lanço seguida de incorporação
- Em geral aplica-se 100g de calcário na cova para cada tonelada de calcário aplicada em área total.

f) Aplicação em profundidade (30 a 40 cm)

- Usar grade pesada e, ou subsolador.

g) Aplicação em pequenas áreas

- Aplicar a lanço manualmente. Deve-se usar luvas ao se manusear o calcário tendo em vista se tratar de um material cáustico.

EXERCÍCIOS

I. Marque apenas as afirmativas que considerar corretas

1. A maior parte dos solos brasileiros são ácidos.
2. A maior parte dos solos brasileiros são alcalinos.
3. A principal causa da acidez dos solos é a matéria orgânica
4. A principal causa da acidez dos solos brasileiros é o material de origem.

5. A principal causa da acidez dos solos brasileiros é o elevado grau de intemperização, causando acúmulo de Al.
6. A acidez ativa é de mais difícil correção que a acidez potencial.
7. A acidez ativa pode ser representada pela expressão: $\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$.
8. A acidez potencial é representada pelos teores de Al solúvel e os íons H^+ não-trocáveis.
9. A acidez potencial pode ser estimada pela soma H^+Al .
10. Solos mais ricos em matéria orgânica e argila apresentam maior acidez potencial.
11. Solos com maior acidez potencial apresentam maiores teores de bases trocáveis.
12. Solos com maior acidez trocável geralmente são mais ricos em Fe, Cu e Mn e pobres em Mo e P.
13. Solos com pH acima de 5,5 não apresentam problema com Al tóxico.
14. A maior disponibilidade de S, B e N no solo ocorre em pH próximo a 6,5.
15. O aumento do pH até 6,5 causa um decréscimo na disponibilidade de P, Ca e Mg.
16. A nitrificação e a decomposição da matéria orgânica contribuem com a acidez potencial do solo.
17. A ureia tem maior potencial de acidificação do solo que o sulfato de amônio.
18. A absorção de nutrientes pelas plantas é uma fonte de acidez potencial.

19. Os minerais 2:1 apresentam maior capacidade de gerar acidez no solo que os óxidos de Fe e Al.
20. A acidez trocável pode ser determinada em laboratório por titulação com NaOH.
21. Solos alcalinos só ocorrem em solos jovens.
22. Na região semiárida os solos são todos alcalinos.
23. Solos originados de calcário serão sempre alcalinos.
24. Solos alcalinos podem ser originados de vários tipos de rocha.
25. A supercalagem refere-se à aplicação de calcário em excesso.

II. Calcule o PRNT de um calcário que contém 40% de CaO e 12% de MgO. Sabe-se que 30% das partículas têm diâmetro de 2 a 0,84 mm, 25% com diâmetro entre 0,84 e 0,3 mm e as demais partículas são de tamanho inferior a 0,3 mm.

- a) 101,36%
- b) 66%
- c) 66,90%
- d) 45%

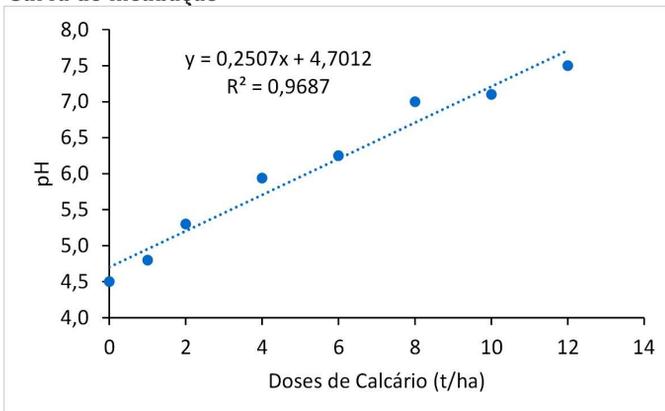
III. A análise de um solo resultou nos seguintes resultados: $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 4,5$; $\text{P} = 2,6 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Na}^+ = 0,2 \text{ cmolc dm}^{-3}$; $\text{K}^+ = 0,15 \text{ cmolc dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} = 1,2 \text{ cmolc dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} = 0,4 \text{ cmolc dm}^{-3}$; $\text{H} + \text{Al} = 5,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$; $\text{Al}^{3+} = 1 \text{ cmolc dm}^{-3}$. Neste solo, após a calagem e adubação de plantio serão cultivadas plantas de milho ($\text{V}_2 = 60\%$) até o estágio V_8 (oito folhas definitivas). Para calagem, se necessário será utilizado calcário dolomítico calcinado com $\text{PRNT} = 100\%$.

1. A necessidade de calagem calculada pelo método da saturação por bases será de:
 - a) 2,21 t/ha
 - b) 4,42 t/ha
 - c) 1,10 t/ha
 - d) 5,54 t/ha

2. Para o solo da questão III, qual a necessidade de calcário calculada pelo método dos teores de Al, Ca e Mg trocáveis? Considere $Y = 3,5$; $X = 3,0$, $mt = 10\%$ e $PRNT = 110\%$
 - a) 7,34 t/ha
 - b) 5,68 t/ha
 - c) 3,52 t/ha
 - d) 1,4 t/ha

- IV. Considere que foi realizado um ensaio da curva de incubação para recomendação de calagem, obtendo-se a seguinte curva:

Curva de incubação



1. Com base na imagem acima, qual a dose de calcário necessária para o solo atingir pH 5,8?
 - a) 4,0 t/ha
 - b) 4,38 t/ha
 - c) 2,1 t/ha
 - d) 4,80 t/ha

2. Qual o pH inicial do solo (antes da calagem)?
 - a) 4,5
 - b) 4,7
 - c) 5,0
 - d) 3,5

5

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

5.1 Aspectos gerais

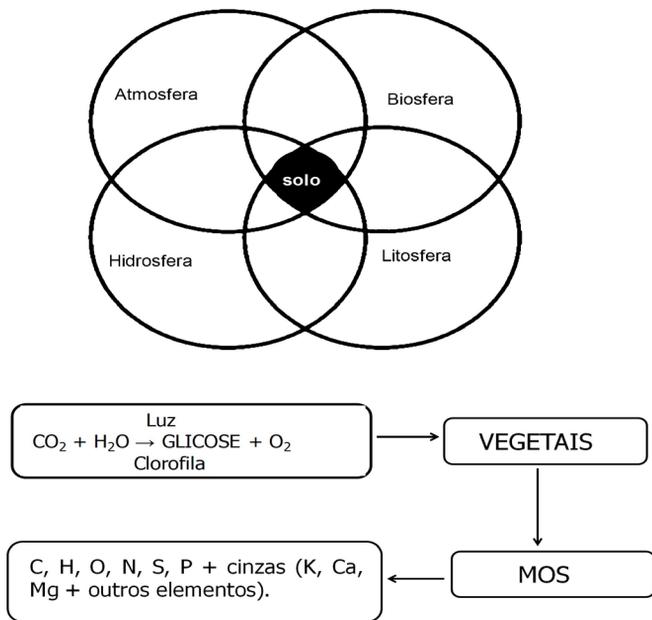
O solo é um compartimento que apresenta grande dinamismo em seus constituintes e está intimamente ligado às características e aos processos que ocorrem na atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera (Figura 19). A fase sólida é constituída da fração mineral e orgânica. A fração orgânica corresponde a matéria orgânica do solo, sendo que o elemento carbono corresponde a 58% da MOS, H 6%, O 33%, enquanto que N, S, P contribuem com cerca de 3%, individualmente.

Desta forma, de uma maneira mais ampla, a matéria orgânica do solo (MOS) compreende todos os compostos orgânicos do solo. Entretanto, quando realizada uma análise de solo para matéria orgânica, geralmente considera-se apenas a matéria orgânica que passa na peneira de 80 mesh ou 0,177 mm de abertura.

A MOS influencia sobremaneira os atributos do solo e, portanto, além de constituinte do sistema solo, deve ser entendida como condicionante das características do mesmo e não erroneamente

como apenas fornecedora de nutrientes às plantas. Daí a importância do estudo aprofundado da MOS com fins do manejo da fertilidade do solo, a fim de se obter maiores produtividades por área, bem como para preservação dos ecossistemas agrícolas.

Figura 19. Solo (pedosfera) como sistema integrador das quatro esferas fundamentais da terra.

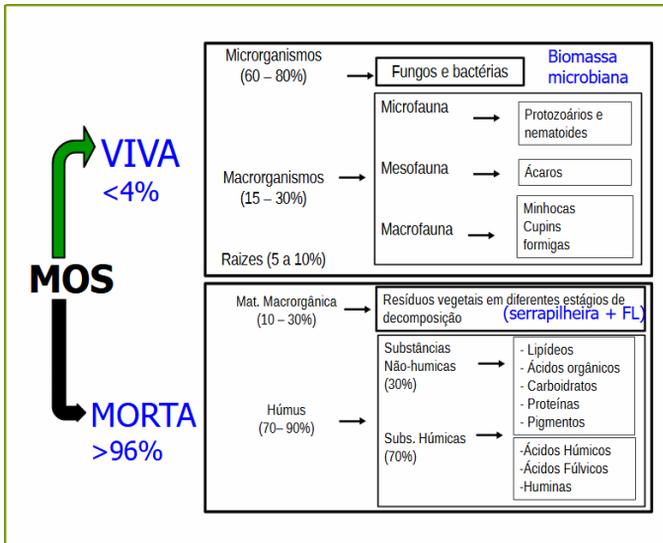


Fonte: Novais et al. (2007).

5.2 Compartimentos da matéria orgânica do solo

De maneira geral, a matéria orgânica é constituída por dois grandes compartimentos: a matéria orgânica viva que compreende cerca de 4% da matéria orgânica total do solo e a matéria orgânica morta com cerca de 96% (Entretanto, esta classificação pode ser mais bem detalhada para fins de compreensão de suas funções no solo), Figura 20.

Figura 20. Compartimentos da matéria orgânica do solo.



Fonte: Novais et al. (2007).

a) *Matéria viva*

Compreende ao C associado às células vivas – raramente ultrapassa 4% do C do solo - que está temporariamente imobilizado, mas que apresenta potencial de mineralização (fonte). Geralmente, se subdivide a matéria orgânica viva em três compartimentos: raízes (5 – 10%) macroorganismos ou fauna do solo (15 – 30%) e microrganismos (60 – 80%).

Esses três compartimentos são parte integrante dos processos biológicos, mineralização, imobilização e formação das substâncias húmicas.

É importante ressaltar que se trata dos aspectos ligados ao manejo da fertilidade do solo, quando se fala em matéria orgânica se denota ao material orgânico na vivente do solo.

b) Matéria orgânica não vivente

Geralmente compreende mais de 96% da matéria orgânica do solo e engloba a matéria macrororgânica (serrapilheira e fração leve), as substâncias húmicas e as substâncias não húmicas. A serrapilheira, ou pilheira compreende aos resíduos de origem vegetal depositados na superfície do solo, desde os não decompostos aos em estágio de decomposição avançada. Geralmente essa fração constitui uma manta de resíduos orgânicos sobre o solo das florestas. A serrapilheira não só é fonte de carbono e nutrientes para a fauna e microrganismos do solo, mas pode ser também o próprio abrigo dos mesmos. Daí a necessidade de se compreender mais essa fração, com fins na manutenção da vida no sistema solo e para a manutenção do equilíbrio ambiental das florestas.

A fração leve, por sua vez, corresponde aos materiais orgânicos sobre do solo em diversos estágios de decomposição e que, diferentemente da serrapilheira, não são reconhecíveis, ou seja, não se pode dizer sobre a sua origem (vegetal ou animal).

As substâncias não-húmicas correspondem às biomoléculas como lipídios, ácidos orgânicos, carboidratos, proteínas e pigmentos. Algumas destas substâncias podem se modificar em ou se combinarem para formar as substâncias húmicas.

As substâncias húmicas (Figuras 21, 22 e 23) podem ser classificadas como ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e húmicos. As figuras abaixo ilustram exemplos destas substâncias.

Figura 21. Modelo de substâncias húmicas e da associação substâncias húmicas-argila e substâncias húmicas-íons metálicos proposto por Kleinhempel (1970) citado por Steinberg (2003).

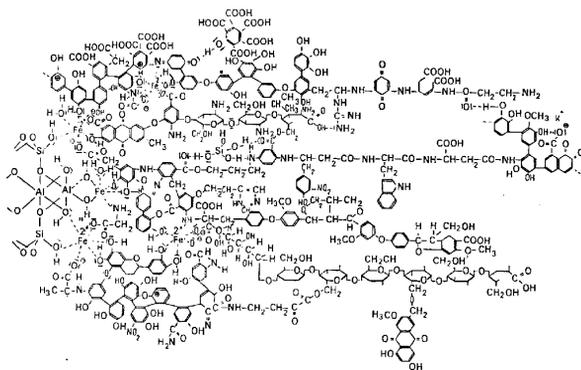


Figura 22. Estrutura proposta para o ácido fúlvico (Adaptado de Schnitzer, 1878)

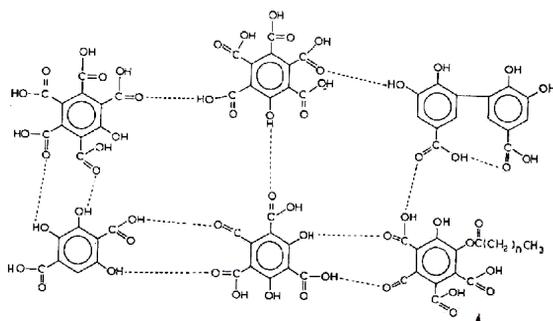
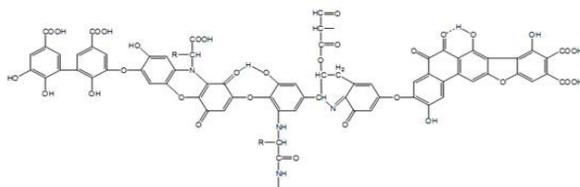


Figura 23. Modelo de ácido húmico proposto por Stevenson (1982).



Fonte: Extraído de Novotny (2002).

5.3 Funções da matéria orgânica do solo

a) CTC

A matéria orgânica influencia os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Figura). Em solos altamente intemperizados a CTC do solo é proveniente principalmente da matéria orgânica. Este fato geralmente é confirmado pelo excesso de carga positiva no horizonte B destes solos, onde o teor de matéria orgânica é praticamente zero. A CTC na matéria orgânica é desenvolvida pela dissociação do H dos grupos funcionais como carboxílicos, fenólicos e álcoois terciários.

b) Complexação de metais

As cargas negativas presente nos grupos funcionais da matéria orgânica, podem atuar como quelantes ou complexantes e assim diminuir a sua toxicidade para as plantas de íons tóxicos como Al, Cd, Pb e diversos outros. Por outro lado, a complexação de micronutrientes como Fe, Mn e Zn pode evitar a precipitação destes elementos no solo em pH elevado e, portanto, aumentar a disponibilidade para as plantas.

c) Diminuição da adsorção de fósforo

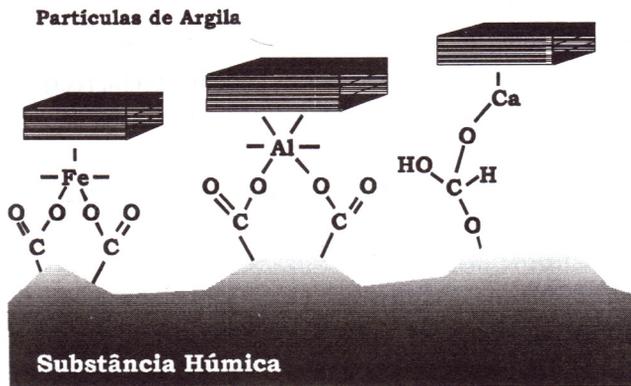
Em solos altamente intemperizados a adsorção de P em formas solúveis de Fe e Al, e em óxidos de Fe e óxidos de Al e ainda em argilas 1:1 com cargas positivas (em pH ácido), a matéria orgânica pode bloquear os pontos de adsorção de fósforo na fase sólida do solo e aumentar a disponibilidade de P para as plantas.

d) Agregação do solo e umidade do solo

Por meio de forças físicas e ligações químicas (pontes de cátions, troca de ligantes), a matéria orgânica promove a união de partículas primárias (argila, silte e areia) do solo e promove

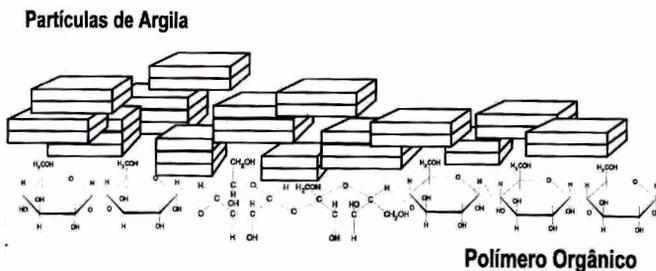
a formação e estabilidade de agregados (Figuras 24 e 25). Desta forma, a matéria orgânica contribui para a formação da estrutura granular, a qual proporciona maior espaço para a retenção de água e ar para as plantas de forma mais equilibrada. A melhoria da estrutura do solo impacta positivamente no fluxo de ar e água para as plantas e na atividade biológica do solo (Figura 26).

Figura 24. Modelo de interação entre substâncias húmicas e argilas por meio de pontes de cátions.



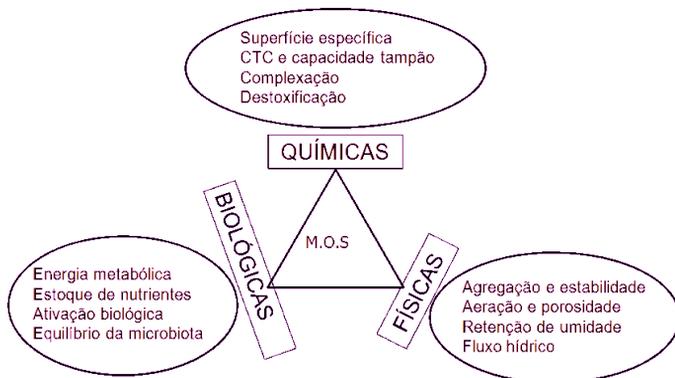
Fonte: Canellas et al. (2008)

Figura 25. Representação esquemática de um polímero adsorvido diretamente à superfície do mineral de argila formando um macroagregado.



Fonte: Canellas et al. (2008).

Figura 26. Influência da matéria orgânica sobre os atributos químicos, físicos e biológicos.



Fonte: Adaptado de Guerra *et al.* (2008).

e) Fonte de nutrientes

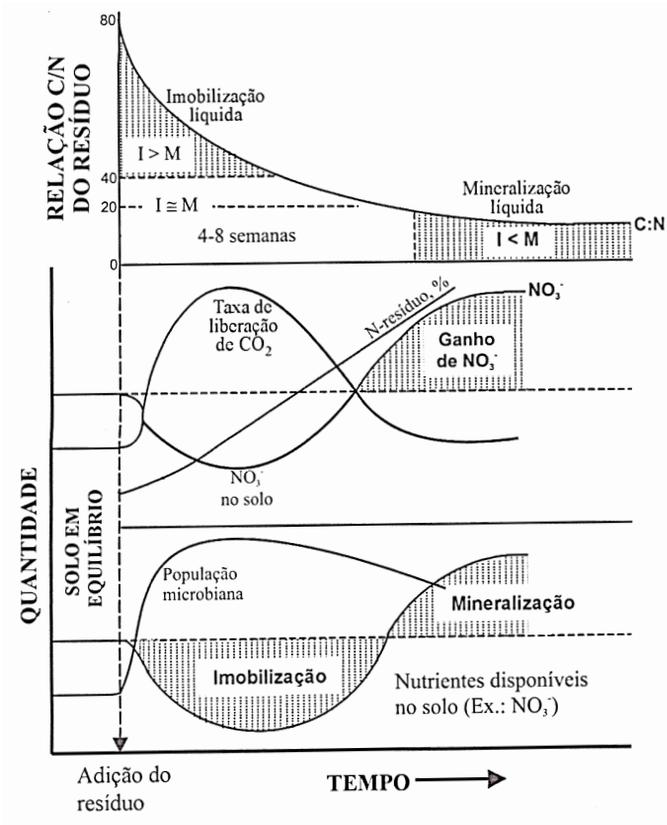
Durante sua decomposição, a matéria orgânica poderá liberar nutrientes para as plantas em quantidade que dependerá da quantidade disponível, da taxa de decomposição, grau de decomposição e, dentre outros fatores da relação C/N (carbono/nitrogênio) (Tabela 14 e Figura 27)

Tabela 14. Matéria orgânica como fonte de nutrientes em função das relações C/N, C/P e C/S.

Qualidade da MO	Relações			Imobilização (I)/ Mineralização (M)	Disponibilidade dos nutrientes
	C:N	C:P	C:S		
Pobre	> 30	> 300	> 400	I > M	Diminui
Intermediária	20-30	200-300	200-400	I = M	Não altera
Rica	< 20	< 200	< 200	I < M	Aumenta

Fonte: Novais *et al.* (2007).

Figura 27. Esquema ilustrativo dos processos de mineralização e imobilização durante a decomposição dos resíduos orgânicos.



Fonte: modificado de Stevenson (1986).

f) Ativação biológica

Por ocasião a decomposição e, ou alteração da matéria orgânica do solo, muitos compostos orgânicos são liberados pela atividade biológica, os quais podem estimular a atividade de muitos grupos de microrganismos do solo como fixadores de nitrogênio, nitrificadores, solubilizadores de fosfatos, micorrizas, e diversos outros.

5.4 Decomposição da matéria orgânica do solo

- *Decomposição*: Decompor significa separar em partes (fragmentação mecânica e física) os constituintes de um certo material.
- *Mineralização*: Processo de decomposição que leva à desorganização estrutural dos compostos orgânicos complexos, transformando-os em minerais ou compostos inorgânicos mais simples.
- *Humificação*: Processo conservador que provoca a alteração nos resíduos orgânicos que resulta em complexos coloidais relativamente estáveis. Compreende a síntese e ressíntese de produtos de decomposição/mineralização para formar compostos de alto peso molecular.

A quantidade de matéria orgânica retida no solo é resultante do balanço entre a quantidade adicionada e a quantidade removida pela decomposição (Figura 28). Diversos fatores influenciam a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo, tais como clima, relevo, temperatura, fertilidade do solo, teor de argila, mineralogia, pH do solo, presença de substâncias tóxicas, relação C/N dos materiais orgânicos adicionados, composição química dos resíduos (teores de proteínas, carboidratos, nutrientes, ligninas, fenóis, outros) (Figura 29).

A MO presente no solo pode ser entendida como sinônimo de fertilidade do solo. A sua presença afeta sobremaneira os atributos químicos, físicos e biológicos do mesmo, além de fornecer nutrientes às plantas.

A compreensão da importância da MOS é de suma importância para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, que gere produção de alimentos e fibras, mas que impacte o mínimo possível ao meio ambiente.

Figura 28. Visão esquemática do solo como uma máquina decompositora (Moreira & Siqueira, 2006).

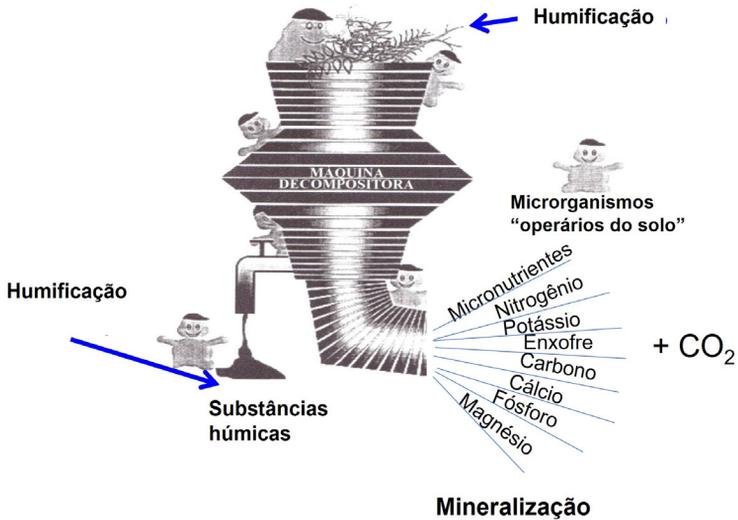
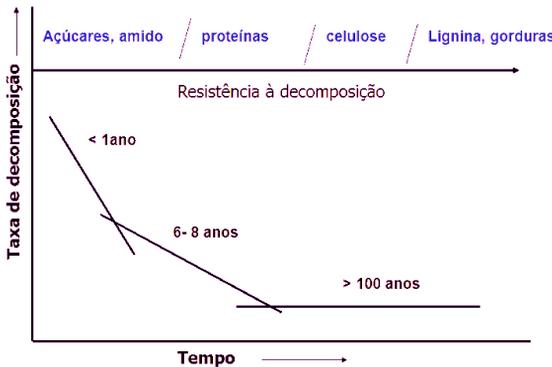


Figura 29. Esquema ilustrativo da taxa de decomposição hipotética de resíduos orgânicos em função da sua composição.



Fonte: Moreira & Siqueira (2006).

Sistemas de produção agrícolas ou áreas nativas que sofrem perda significativa de MOS, em virtude das atividades antrópicas,

são mais propensos a sofrerem também a destruição paulatina do sistema solo, por consequente, perda da capacidade de sustentar a vida. Isso porque a MO é um condicionante dos atributos do solo e componente do ciclo do C, mantendo contínua comunicação com as outras esferas fundamentais – atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera. Ao passo que se acelera a decomposição da MOS, pela exposição e aeração da superfície, como por meio da retirada da cobertura vegetal, seguida de arações sucessivas, liberando maiores quantidades de C para atmosfera, aumentando a problemática do aquecimento global.

A preservação do C existente no solo ou as práticas que favorecem o aporte de resíduos orgânicos, como reflorestamento, calagem e adubação, são fundamentais para recuperação e posterior inclusão de áreas degradadas aos sistemas agrícolas. Como se vê, a infinidade de benefícios da MO, não se pode pensar em sustentabilidade ambiental sem levar em consideração a conservação da MOS.

EXERCÍCIOS

1. Conceitue matéria orgânica do solo.
2. Cite os compartimentos da matéria orgânica do solo.
3. Com base nas características de clima, solo e relevo, explique de forma objetiva porque em solos sob vegetação de Caatinga o teor de matéria orgânica geralmente é muito baixo.
4. Explique porque solos mais argilosos geralmente têm maior teor de matéria orgânica que solos arenosos.
5. Descreva sobre os efeitos físicos, químicos e biológicos da matéria orgânica do solo.
6. Fale sobre a importância das substâncias húmicas nos atributos físicos e químicos do solo.

7. Manejando o solo, como você faria para aumentar o teor de matéria orgânica do solo?
8. Você acha que a adubação mineral aumenta a matéria orgânica do solo?
9. A calagem aumenta ou diminui a matéria orgânica do solo? Explique.
10. Para proteger o solo contra a erosão, que características da matéria orgânica são desejáveis?
11. Descreva o significado de relação C/N, imobilização e mineralização.
12. Porque em sistema de plantio direto o Al tóxico geralmente é baixo, mesmo em alguns casos o solo sendo ácido.

6

MACRO E MICRONUTRIENTES NO SOLO

6.1 Nitrogênio

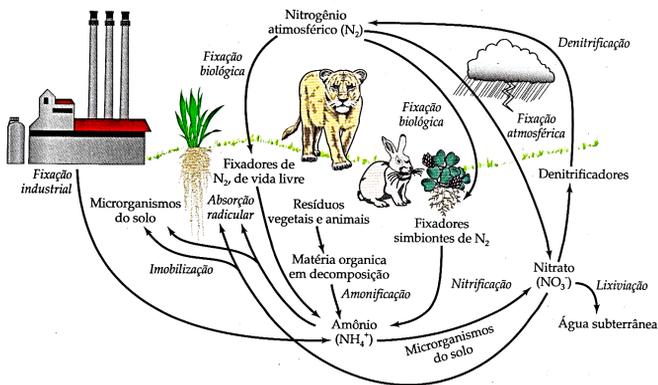
O nitrogênio (N) é o macronutriente exigido em maiores quantidades pelas plantas, ao mesmo tempo em que é o mais dinâmico no solo. Essa dinâmica se dá pela alta reatividade do elemento e de seus compostos, podendo ser perdido para maiores profundidades, pela lixiviação, ou perdido para atmosfera na forma gasosa, como consequência dos processos de volatilização (Figura 30).

Em razão da complexa mobilidade do N, se torna difícil a sua manutenção, bem como determinação dos teores N presente ao longo do perfil, para fins agronômicos. No entanto, os teores deste elemento quando em profundidade segue os teores de matéria orgânica, fato que se deve ao N ser componente estrutural das plantas e o grande aporte de matéria orgânica do solo ser oriundo de resíduos vegetais.

O N aportado no solo, ao contrário dos demais minerais, quase não é fornecido pela rocha matriz. Mais de 78% da atmosfera

é constituída por N em sua forma gasosa (N_2), entretanto não é absorvido pelas plantas na forma elementar. Assim sendo, só pode ser aproveitado pelas plantas quando na forma orgânica ou inorgânica. Desta forma, o N_2 precisa passar por processo de fixação industrial para posterior produção dos fertilizantes nitrogenados minerais.

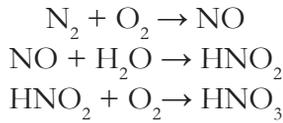
Figura 30. Esquema do ciclo do nitrogênio na natureza.



Fonte: Epstein & Bloom (2006).

a) Fixação atmosférica de N

Uma das formas de aporte de N da atmosfera é quando o mesmo sofre oxidação na atmosfera terrestre, utilizando calor e energia das descargas elétricas, tendo como produto o nitrito. O nitrito pode ser carreado ao solo pelas chuvas e, no solo, pode ser oxidado novamente no processo de nitrificação, formando o nitrato, que é o composto mineral preferencialmente absorvido pelas plantas. O processo de fixação atmosférica de N ocorre de acordo com as seguintes equações:

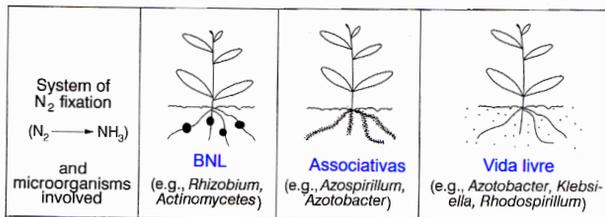


Geralmente a quantidade de N fixada por este processo é pequena (em torno de 1 a 50 kg/ha/ano (contribuindo pouco com a nutrição nitrogenada das culturas)).

b) Fixação biológica de N

Outra forma de incorporação de N é pelo processo de fixação biológica realizada por microrganismos de vida livre, ou em simbiose com os vegetais, notadamente as bactérias do gênero *Rhizobium*, que se associam ao sistema radicular das leguminosas formando nódulos de infecção (Figura 31). O N fixado nos vegetais pode potencialmente ser mineralizado e enriquecer as áreas de cultivo. Assim, a fixação biológica é de grande importância não só para as leguminosas (Tabela 15), supridas em até 75% do N fixado, mas também para as não-leguminosas, que se beneficiam da mineralização dos restos de leguminosas deixados sobre o solo ou incorporado como adubação verde, economizando fertilizantes nitrogenados.

Figura 31. Tipos de microrganismos fixadores de N.



Fonte: Mengel & Kirkby (1987).

Tabela 15. Estimativas de fixação de nitrogênio em diversas espécies leguminosas

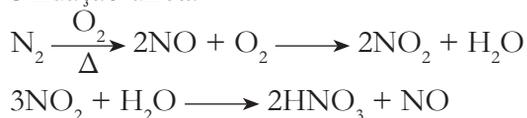
Espécie leguminosa	N² fixado
	kg de N/ha/ano ou ciclo
Produtora de grãos	
Soja (<i>Glycine max</i>)	60 - 178
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	2,7 - 110
Caupi (<i>Vigna unguiculata</i>)	73 - 354
Amendoim (<i>Arachis hypogea</i>)	72 - 124
Guandu (<i>Cajanus cajan</i>)	168 - 280
Calopogonio (<i>Calopogonium mucunoides</i>)	370 - 450
Feijão mungo (<i>Vigna mungo</i>)	63 - 342
Grão de bico (<i>Cicer arietinum</i>)	50 - 103
Ervilha (<i>Pisum sativum</i>)	52 - 77
Forrageiras	
Leucena (<i>Leucaena leucocephala</i>)	500 - 600
Centrosema (<i>Centrosema pubescens</i>)	126 - 398
Estilosantes (<i>Stylosanthes</i> spp.)	34 - 220
Pueraria (<i>Pueraria phaseoloides</i>)	30 - 99
Espécie arbórea	
Acacia (<i>Acacia meamsii</i>)	200
Floresta tropical	
Em regeneração	71 - 78
Após estabilização (40 anos)	35 - 45

Fonte: Novais et al. (2007)

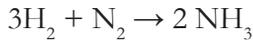
c) Fixação industrial

A fixação industrial é realizada pela indústria de fertilizantes e pode ocorrer das seguintes formas:

a) Oxidação direta



b) Síntese da amônia



O gás amônia é a base para a fabricação de diversos fertilizantes nitrogenados como a ureia, o sulfato de amônio, o nitrato de amônio e outros.

c) Formas de N no solo

O nitrogênio mineral no solo é representado pelas formas iônicas amônio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) e, muito raramente, como nitrito (NO_2^-).

Tendo em vista que a quase totalidade do N do solo se encontra na forma orgânica, tem-se que a incorporação de matéria orgânica ao solo bem como sua decomposição ou mineralização controla, em última instância, o teor de N no solo.

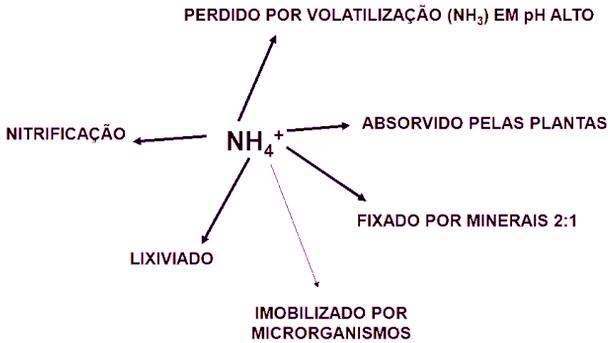
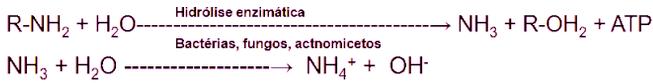
Fatores como teor de argila e temperatura influenciam, em princípio, a taxa de decomposição e mineralização, por conseguinte a o teor N no solo.

A mineralização do N orgânico (98 a 99% do N presente no solo) ocorre na medida em que os microrganismos heterotróficos decompõem a matéria orgânica, os quais requerem carbono orgânico como fonte de energia. Diversos gêneros de fungos e bactérias atuam no processo, em uma ou em mais de uma reação, dentre as várias que ocorrem na decomposição da matéria orgânica.

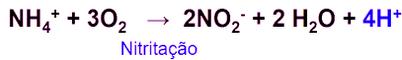
A aminação consiste na hidrólise de proteínas, com a liberação de aminas e aminoácidos, e é considerada a primeira etapa da mineralização do N orgânico (figura).

O amônio é o primeiro produto mineral da mineralização e é liberado por microrganismos heterotróficos que utilizam as aminas e aminoácidos. Essa etapa é considerada a segunda da mineralização, sendo denominada de amonificação.

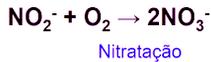
AMONIFICAÇÃO:



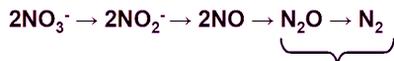
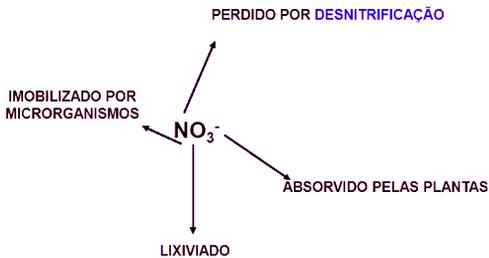
Nitrosomonas



Nitrobacter



Destinos do NO₃⁻



Perdidos por volatilização

d) Definição da adubação nitrogenada

A adubação nitrogenada é baseada na seguinte expressão:

$$N \text{ (kg/ha)} = (\text{RNC} - \text{SNS}) f$$

onde:

RNS = Requerimento de N pela cultura (produção de matéria seca)

SNS = Suprimento de N pelo solo (dificuldade)

f = fator de eficiência de uso de N (cultura bem manejada:

f = 1,33 = 1/0,75)

EXERCÍCIOS

1. Explique como os processos de mineralização e imobilização de N no solo são influenciados pela relação C/N e pela composição dos materiais orgânicos adicionados e como estas informações podem ajudar na escolha dos materiais orgânicos serem utilizados como adubo orgânico ou como cobertura morta.
2. Cite o nome de cinco espécies de leguminosas que poderiam ser empregadas como adubos verdes em função de sua grande capacidade de fixação biológica de N.
3. Por que não se dispõe de métodos analíticos adequados a laboratório de rotina para estimar a disponibilidade de N?
4. Qual a forma de nitrogênio (NH_4^+ ou NO_3^-) que a planta tolerante a Al^{3+} deverá, preferencialmente, absorver? Justifique.
5. Como você explicaria a falta de resposta de algumas leguminosas a adubação nitrogenada em muitas regiões do Brasil?
6. Por que os fertilizantes amoniacais têm poder acidificante do solo? A ureia, apesar de apresentar o N na forma amídica, é mais ou menos acidificante que o sulfato de amônio? Justifique.

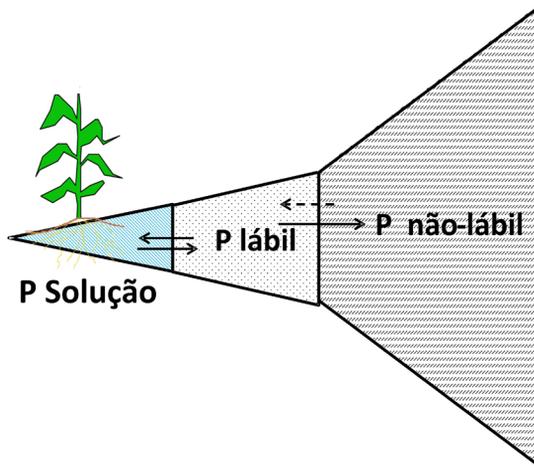
7. A aplicação de KNO_3 em uma lavoura de arroz inundado não surtiu o efeito no aumento de produção esperado por um agricultor, mesmo sabendo que o solo era deficiente em N. Como se explica isso?
8. O que você pensa sobre a recomendação para aplicação de sulfato de amônio e calcário simultaneamente na cova de plantio de goiabeira?

6.2 Fósforo no solo

O fósforo (P) é o nutriente junto ao enxofre (S) menos requerido pelas culturas, no entanto a adubação fosfatada é a mais utilizada nos sistemas agrícolas, inclusive superiores ao N, nutriente mais requerido pelas plantas. Este fato é devido a pobreza dos solos brasileiros neste nutriente, associado à sua forte interação com a fase sólida do solo, principalmente em solos altamente intemperizados e ácidos. Estima-se que mais de 90% das análises de solo no Brasil mostram teores baixos.

De forma simplificada, o fósforo se encontra no solo em três principais frações: P-solução, P-lábil, e P-não lábil (Figura 32). O *P-solução* está prontamente disponível para as plantas, mas é encontrado em baixíssimas concentrações na solução do solo (geralmente inferior a 0,05 mg/L de solução). O *P-lábil* encontra-se em equilíbrio dinâmico com o P-solução e corresponde à reserva de manutenção do P-solução do solo. Geralmente o P-lábil é referido como P disponível para as plantas. O P-não lábil corresponde a diversas formas de P ligadas fortemente à fase sólida do solo, ou mais precisamente aos argilominerais do solo e aos óxidos de Fe e Al.

Figura 32. Ilustração esquemática da distribuição das frações de fósforo no solo.



Fonte: Adaptado de Raji (1991).

Dependendo da natureza do composto, o P pode se encontrar como P orgânico (na forma de fosfatos de inositol, ácidos nucleicos e ésteres de P), e P inorgânico em ligações com Fe, Al, Ca, argilas silicatadas e óxidos, dentre outras formas (Gatiboni *et al.*, 2005; Souza Júnior *et al.*, 2012).

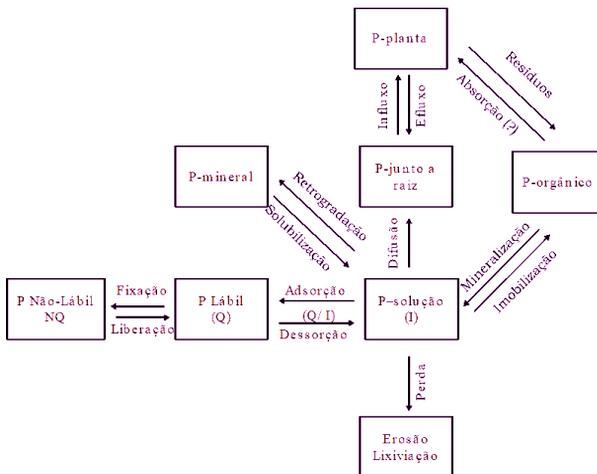
Dentre as formas inorgânicas de P precipitado, têm-se a strengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fluorapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$), hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), fosfato dicálcico dihidratado ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e fosfato octacálcico ($\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Em pH menor que 5,0, há maior ocorrência do P nos minerais que contém Fe e Al, enquanto em pH maiores, isso acontece preferencialmente com cálcio, sendo que a variação do pH pode promover a dissolução e formação de outros compostos (Fixen & Ludwixk, 1982; Moore & Reddy, 1994). Vale ressaltar que em alguns solos da região semiárida, especialmente aqueles de pH superiores a 7, o P pode estar precipitado com cálcio, não estando o P disponível às culturas.

Conceitos importantes

- Fator intensidade (I): corresponde a concentração de P na solução do solo (P solução: 0,05 mg/L a 0,2 mg/L). As análises de P avaliam P-lábil + P na solução
- Fator quantidade (Q) ou P-lábil: corresponde ao reservatório de P que em equilíbrio com o P-solução. Corresponde ao P capaz de ressuprir a solução do solo
- Fator capacidade: É a relação entre o P-lábil (Q) e o P-solução ($I = \text{PODER TAMPÃO} = Q/I$)

As diferentes formas e transformações do P do solo podem ser melhor visualizadas na figura abaixo (Figura 33).

Figura 33. Formas de fósforo no sistema solo-planta; interdependências e equilíbrios.

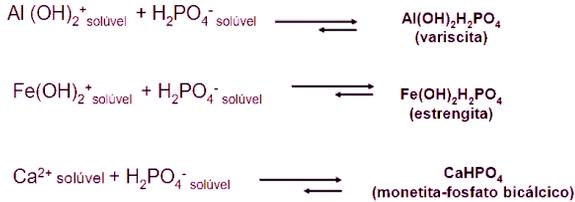


Fonte: Novais & Smith (1999).

A forma de P absorvida pela planta depende do pH do solo conforme as reações abaixo.



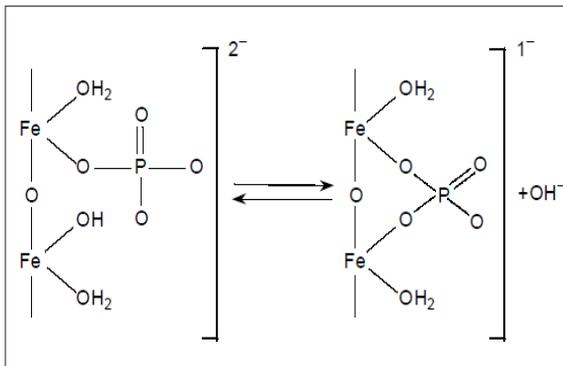
Fósforo precipitado



Fósforo adsorvido

Constitui o fósforo ligado covalentemente aos óxidos de Fe e de Al (Figura 34) e ao P ligado de forma eletrostática a superfícies destes óxidos ou de caulinita, carregadas positivamente.

Figura 34. Esquema representativo da adsorção do P por meio de ligações mono e bidentadas (binucleadas), proporcionando a formação de fósforo não-lábil no solo.



Fonte: Novais & Smith (1999).

Fósforo orgânico

- Constitui de 20 a 70% do P total do solo
- O P orgânico (Po) ocorre em teores proporcionais a M.O

Compostos contendo P

- fosfatos de inositol
- fosfolipídeos
- ácidos nucleicos
- ATP

Po não é prontamente disponível - necessário ocorrer sua mineralização: depende da relação C/P.

C/P 200-300 → I = M

C/P < 200 → M > I

C/P > 300 → I > M

- Para cada 1% de M.O será fornecido 1 a 4 kg/ha de P ou 3 a 10 kg/ha de P_2O_5
- Plantas deficientes em P apresentam aumento da atividade da fosfatases ácidas (liberação de P).

EXERCÍCIOS

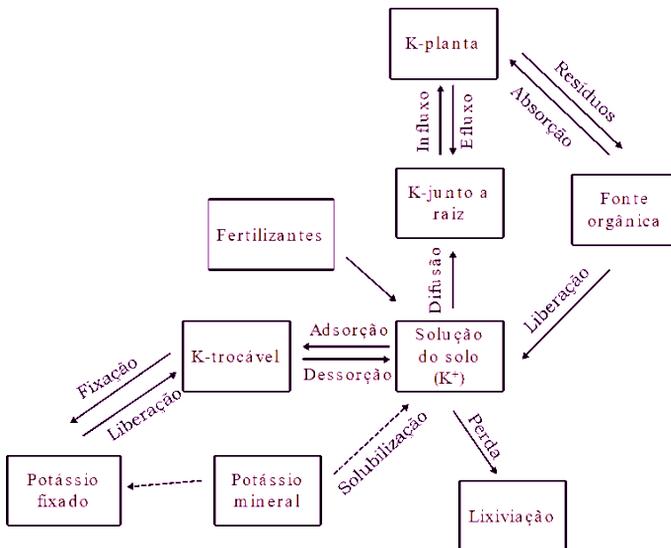
1. Fale sobre a importância da adubação fosfatada nos solos brasileiros.
2. Porque nos solos brasileiros aplicam-se elevadas doses de P, mesmo sendo um nutriente pouco exigido pelas plantas?
3. O que você entende por P fixado?
4. O que é fósforo lábil?
5. Descreva os seguintes termos: Fator intensidade, fator quantidade e fator capacidade de P no solo.
6. Como a textura do solo influencia na sua capacidade de fixação de P?
7. O que você entende por fósforo orgânico?

8. Como os microrganismos podem interferir na disponibilidade de P para as plantas?
9. Você recomendaria a adubação fosfatada antes ou após a calagem? Explique.
10. Em solos jovens deveria haver mais fósforo ligado a Ca ou a Al? Explique.

6.3 Potássio no solo

No Brasil o potássio é o terceiro nutriente mais aplicado no solo na forma de fertilizantes. Os solos brasileiros, altamente intemperizados apresentam baixos teores de K disponível. Em comparação ao N e ao P, o potássio apresenta dinâmica relativamente simples (Figura 35), estando no solo como íon K^+ , sendo esta a forma absorvida pelas plantas.

Figura 35. Esquema representativo da dinâmica de potássio no solo.



De forma simplificada, o K do solo encontra-se em cinco compartimentos:

a) *K solução*

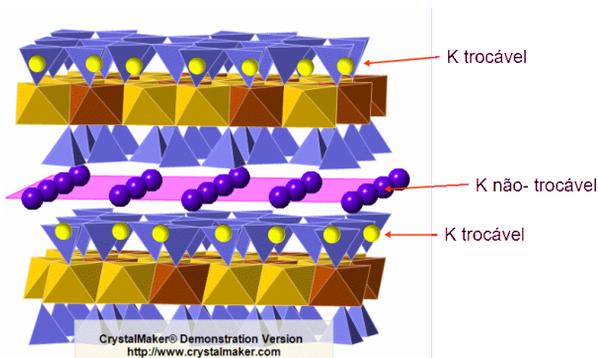
- Apenas uma pequena fração do K trocável
- Controla a difusão de K até as raízes
- Apresenta interações com outros cátions (Ca, Mg, Na, Al).

b) *K trocável*

- Fração de K na fase sólida capaz de suprir a solução do solo.
- Íons K^+ adsorvido nas cargas negativas dos coloides do solo
- Em termos de disponibilidade para as plantas, é a forma mais importante.

c) *K Não-trocável*

- Fração ligada fortemente a estrutura de mineais 2:1
- Pode se tornar trocável a médio e a longo prazo
- Mais presente em solos pouco intemperizados



d) *K mineral*

- K que compõe a estrutura de muitos minerais primários

- Principais minerais: muscovita, biotita , feldspatos (ortoclásio)
- Principal fonte de potássio, sob condições naturais
- Liberação lenta de K.
- Dependente das condições climáticas e do material de origem.
- Exemplo (ortoclásio)
- $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 9\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9 + 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{K}^+$

e) *K lixiviado*

- O K da solução do solo pode ser absorvido ou poderá ser fixado ou poderá ser perdido por lixiviação.
- A quantidade de K lixiviado depende de: volume de água percolada, concentração na solução do solo, CTC, etc.
- Depende da presença de ânions na solução.

EXERCÍCIOS

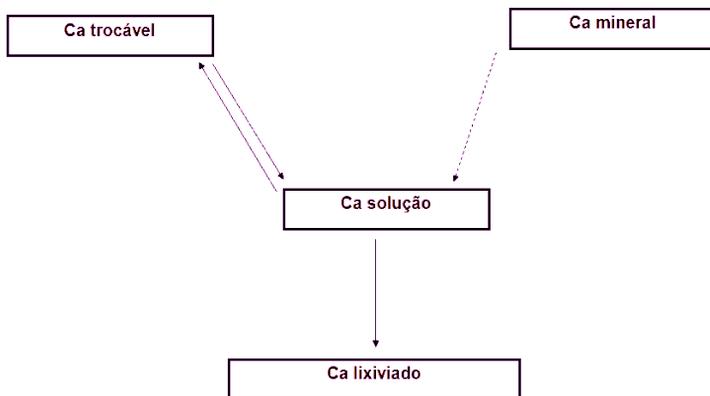
1. Explique por que é comum a carência de K nos solos brasileiros.
2. Descreva a dinâmica do K no solo.
3. Descreva a origem do potássio na natureza.
4. Cite cinco minerais primários contendo K.
5. Descreva a importância do K trocável, K não-trocável e do K mineral.
6. Como ocorre a fixação de K no solo?
7. Porque o K não é mineralizável?
8. Quais minerais contendo K deverão ser encontrados na fração areia de solos velhos e de solos jovens?
9. Quais minerais são utilizados na produção de fertilizantes potássico?
10. Quais os fertilizantes potássicos mais utilizados?
11. Que resíduos orgânicos são ricos em K?

6.4 Cálcio e magnésio no solo

O cálcio (Ca) e o magnésio (Mg), assim como o K, apresentam dinâmica bastante simples no solo. Normalmente não se faz adubações específicas com Ca e Mg uma vez que estes nutrientes são fornecidos às plantas via calagem. No entanto, para o Ca pode-se recomendar aduções foliares em plantas frutíferas e hortaliças do tipo fruto, fato que se deve ao Ca ser absorvido e transportado nas plantas por fluxo transpiratório e como as folhas transpiram mais que os frutos, é comum observar deficiência de Ca nos frutos, a exemplo do fundo preto no tomateiro.

No solo o Ca está presente em quatro compartimentos como mostra a Figura 36 a seguir.

Figura 36. Compartimentos do cálcio no solo.



a) Cálcio na solução

- O Ca atinge as raízes por fluxo de massa
- Umidade do solo é muito importante
- Pode ser inibido competitivamente pelos íons K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} e Al^{3+} .

b) Cálcio trocável

- Ca adsorvido aos coloides do solo
- Está em equilíbrio com o Ca da solução do solo.
- O Ca absorvido da solução é repostado pelos coloides
- O Ca é fortemente adsorvido
- $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > NH_4^+ > Na^+$
- Faz ligações com substâncias húmicas (humatos de cálcio).

c) Cálcio mineral

- A anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) é o principal mineral contendo cálcio para regiões mais chuvosas.
- A calcita ($CaCO_3$) é dominante em regiões semiáridas
- A calagem, a gessagem e a fosfatagem com fosfato natural: Ca mineral.
- A presença de Ca mineral é muito dependente do material de origem e condições climáticas.

d) Cálcio lixiviado

A lixiviação de Ca não é muito comum nos solos, especialmente em solos de elevada CTC. Este fato ocorre porque o Ca é o terceiro cátion retido mais fortemente na CTC do solo depois do H e do Al. Contudo, em solos muito arenosos como os Neossolos Regolítico e Neossolos Quartzarênicos pode haver lixiviação de Ca, principalmente sob baixo teor de matéria orgânica e irrigação descontrolada.

O magnésio apresenta dinâmica similar ao Ca conforme ilustra o esquema abaixo (Figura 37). Trata-se de um macronutriente pouco exigido pelas plantas, contudo, pode haver situações de carência tais como:

- Solos arenosos
- Solos altamente intemperizados

- Altas doses de calcário pobre em magnésio
- Cultivo de espécies mais exigentes (milho, batata, algodão, citros, fumo)

A presença de CO_2 pode aumentar a lixiviação de Ca em função da seguinte reação: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (mais solúvel)

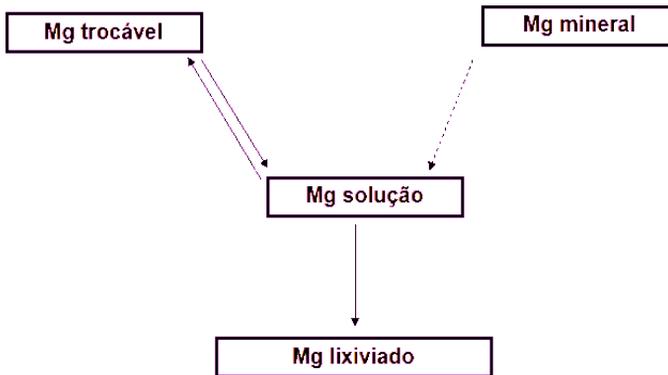


Figura 37. Compartimentos do magnésio no solo.

a) Magnésio na solução

- Fonte imediata de Mg para as plantas
- A solução do solo apresenta concentração elevada (à exceção de solos ácidos).
- Chega até as raízes por fluxo de massa (principalmente).
- Sua absorção é muito afetada pela presença de: Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ e Na^+ .

b) Magnésio trocável

Perfaz de 2 a 20% do complexo de troca catiônica

Idealmente para a maioria das culturas e solos: 10 a 20%

Adubar com Mg se:

- % de Mg na CTC inferior a 3% efetiva
- % de Mg for inferior a % de K na CTC efetiva.
- Concentração de Mg < 0,4 cmol_c/dm³

c) *Magnésio mineral*

- Solos pouco intemperizados: biotita, dolomita, hornblenda, olivina.

A maioria dos solos brasileiros possuem pouco Mg mineral

EXERCÍCIOS

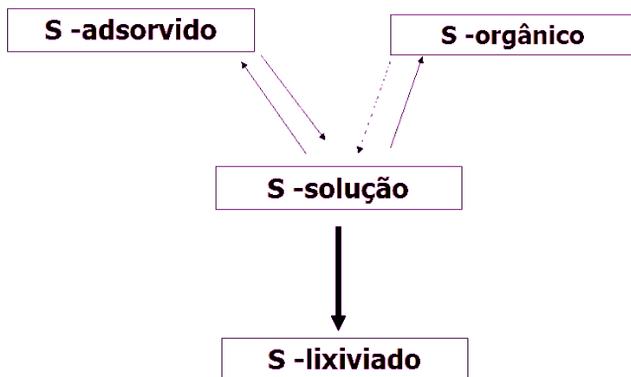
1. Por que não se faz adubações específicas com Ca e Mg?
2. Na agricultura, qual a principal forma de aplicação de Ca e Mg no solo?
3. Qual a melhor relação Ca:Mg para as plantas?
4. Em que situação se faz necessária a aplicação de Ca e Mg além da calagem?
5. Quais espécies agrícolas são muito exigentes em Ca e em Mg?
6. Como o Ca pode diminuir a toxicidade de Al em solos ácidos?

6.5 Enxofre no solo

A concentração de enxofre (S) total no solo varia de 20 a 400 mg kg⁻¹ dependendo de muitos fatores, mas sobretudo do teor de matéria orgânica. A fonte primária de S são as rochas ígneas onde o S encontra-se na forma de sulfato (SO₄⁻²). No solo, cerca de 95% do S encontra-se na forma orgânica, e por tanto, não prontamente disponível para as plantas. Em regiões áridas e semiáridas sais como CaSO₄·2H₂O, MgSO₄, K₂SO₄, Na₂SO₄ são importantes fontes de S. Outra fonte de S é a atmosfera na forma de SO₂ por meio da queima de combustíveis fósseis e atividade vulcânica.

No solo, o enxofre encontra-se basicamente em quatro compartimentos como ilustra a figura abaixo (Figura 38).

Figura 38. Compartimentos do enxofre no solo.



a) *Enxofre orgânico*

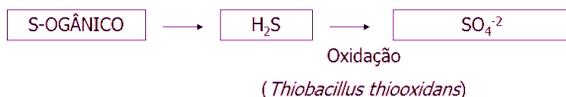
A liberação de S para as plantas depende da relação C/S:

C/S 200 - 400 → I = M (Mineralização é igual a imobilização)

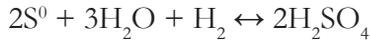
C/S < 200 → M > I (mineralização é maior que imobilização)

C/S > 400 → I > M (Imobilização é superior a mineralização)

As plantas absorvem o S na forma de íon sulfato (SO_4^{2-}). Após a mineralização do S da matéria orgânica ocorre a redução do S a sulfato no solo que é intermediada pelas bactérias do gênero *Thiobacillus*, conforme esquema abaixo. Estima-se que 1% de matéria orgânica fornece de 1 a 4 kg S/ha/cultivo, assim, um solo com 3% de matéria orgânica seria capaz de fornecer cerca de 3 a 12 kg de S/ha por cultivo.

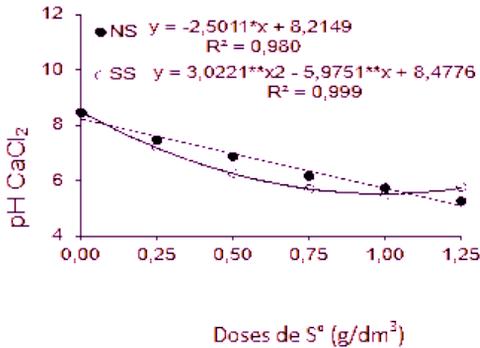


O processo de oxidação de S^0 (enxofre elementar) é semelhante ao que ocorre com o S da matéria orgânica e ocorre conforme a reação abaixo:



A adição de S^0 ao solo gera ácido sulfúrico após sua oxidação, diminuindo o pH do solo. Este processo é útil para solos alcalinos como os da Figura 39.

Figura 39. Efeito de doses de S^0 sobre o pH de dois solos alcalinos, sendo um sódico (SS) e outro não sódico (NS).



Fonte: Autoria própria.

Embora o S^0 seja geralmente utilizado na composição de defensivos agrícolas como os inseticidas, atualmente tem sido utilizado também como revestimento dos grânulos de ureia produzindo assim fertilizantes nitrogenados de liberação controlada, formando uma camada que dificulta a penetração da água no grânulo e uma consequente diminuição ao longo do tempo de sua solubilidade, o mesmo tem sido aplicado também em grânulos de fertilizantes fosfatados para diminuir a taxa de fixação de P no solo.

b) Enxofre na solução do solo

- Solos oxidados: enxofre na forma de SO_4^{-2}
- Fácil lixiviação

- Forma pares iônicos com Ca, Mg, K e Na
- Solos alagados: $\text{SO}_4^{-2} \rightarrow \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{HS}^- + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{FeS}_2$
(pirita)

c) *Enxofre adsorvido*

A adsorção de S ocorre basicamente na superfície dos óxidos de Fe e Al que podem desenvolver cargas positivas. Assim, em solos jovens do semiárido com elevada CTC, este fenômeno praticamente não ocorre.

Fatores que interferem no processo de adsorção:

- pH: quanto menor maior a taxa de adsorção
- Matéria orgânica: maiores teores de M.O diminuem a adsorção de S
- Teores de argila: maiores teores de argila aumentam a adsorção
- Teores de óxidos de Fe e Al: Quanto maiores os teores de óxidos maior a taxa de adsorção
- Tipo de argila: Caulinita > illita > bentonita

c) *Adubação com enxofre*

Ainda não existem recomendações seguras conforme a análise de solo. Contudo, há algumas sugestões para culturas de alta produtividade como a soja.

Adubar com gesso se:

$$\text{Ca}^{2+} < 0,4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$$

$$\text{Al}^{3+} > 0,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$$

$$\text{m}\% > 30$$

Fertilizantes minerais contendo S

- Gesso (18% S).
- Sulfato de amônio (22% S)
- Sulfato de potássio (15% S)
- Sulfato de magnésio (12% S)
- Superfosfato simples (12% S)

6.6 Micronutrientes no solo

Atualmente a literatura internacional específica sobre nutrição mineral de plantas reconhece como micronutrientes os elementos: Cl, Cu, B, Fe, Mn, Ni, Mo e Zn. A fonte primária dos micronutrientes são as rochas, as quais apresentam teores variáveis (Tabela 16). Outros elementos comumente referidos como micronutriente em alguns livros tais como Co, Se e Si, são apenas considerados elementos benéficos ou úteis, uma vez que não atendem aos critérios de essencialidade descritos em Malavolta et al. (1997).

Os micronutrientes são assim denominados devido à sua pequena exigência pelas plantas (geralmente dada em g/ha) e sua concentração nos órgãos vegetais dada em mg/kg. Contudo, devido sua baixa exigência pelas plantas, sintomas de deficiência no campo são raros, ao contrário, podem se tornar tóxicos com maior facilidade em comparação aos macronutrientes. Dentre os micronutrientes, B e Zn são os que mais provocam deficiência no campo, especialmente em solos arenosos e, ou com elevado grau de intemperização. Os micronutrientes são absorvidos da seguinte forma:

- Cátions: Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} e Ni^{2+}
- Ânions: Cl^- , MoO_4^{-2}
- Neutro: H_3BO_3

Nas plantas, o papel principal dos micronutrientes é sua atuação como componente ou ativador enzimático. Sua baixa exigência pelas plantas, de certo modo, se relaciona com suas concentrações no solo (Tabela 16).

- Exigência das plantas: Fe > Mn > B > Zn > Cu > Mo > Ni
- Concentração no solo: Fe > Mn > Zn > Cu > B > Mo > Ni

a) *Origem dos micronutrientes no solo*

Os micronutrientes do solo têm as seguintes origens

- Material de origem (rochas/sedimentos)
- Resíduos animais vegetais
- Fertilizantes e corretivos
- Defensivos agrícolas
- Precipitações pluviométricas (Cl)

Tabela 16. Teores médios de micronutrientes na crosta terrestre e em rochas.

Material	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo	Cl
	----- mg/kg -----						
Crosta terrestre	50.000	1.000	80	70	10	2,3	-
Rochas ígneas							
• granito	27.000	400	40	10	15	2	70
• basalto	86.000	1.500	100	100	5	1	200
Rochas sedimentares							
• calcário	3.800	1.100	20	4	20	0,4	-
• arenito	9.800	10-100	16	30	35	0,2	10
• argilito	47.000	800	95	45	100	2,6	180
Água do mar	2×10^{-3}	2×10^{-4}	1×10^{-6}	5×10^{-4}	4,4	0,01	19.000

Fonte: Harmsen & Vlek (1985) citado por Rajj (1991).

Tabela 17. Faixas de teores de micronutrientes no solo

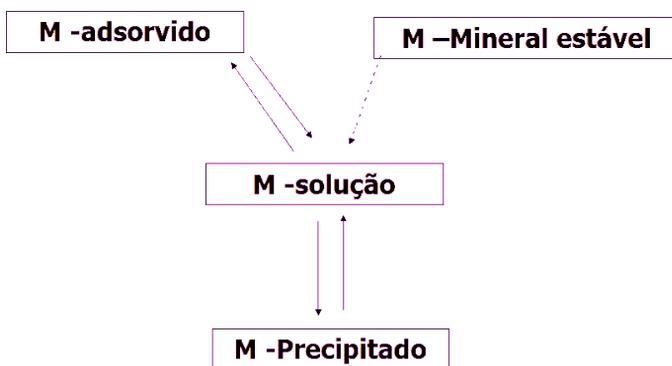
Micronutriente	Teor (mg/kg)
Fe	10.000 - 100.000
Mn	20 - 3.000
Zn	10 - 300
Cu	2 -100
B	2 - 100
Mo	0,2 – 5,0

Fonte: Bissani *et al.* (2004)

b) Formas de micronutrientes no solo

O teor de micronutrientes (M) na solução do solo é controlada pelos processos de adsorção (M-adsorvido), precipitação e solubilização de minerais como ilustra o esquema abaixo (Figura 40).

Figura 40. Esquema ilustrativo dos compartimentos dos micronutrientes no solo.

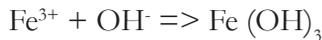


Abaixo seguem alguns minerais contendo micronutrientes

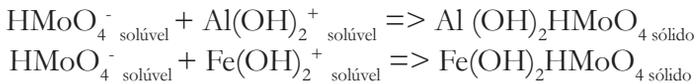
- Fe: óxidos de ferro, pirita
- Mn: óxidos de Mn ($Mn_2O_3 \cdot nH_2O$ e $MnO_2 \cdot nH_2O$).
- Cu: Calcopirita ($CuFeS_2$), Calcocita (Cu_2S) e Bornita ($CuFeS_4$)
- Zn: Esfarelita (ZnS) e Hemimorfita ($Zn_4(OH)2Si_2O_7 \cdot H_2O$)

Na solução do solo os micronutrientes são encontrados da seguinte forma: Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} e Ni^{2+} , Cl^- , MoO_4^{-2} e H_3BO_3 . É importante mencionar que os micronutrientes catiônicos podem formar complexos com moléculas orgânicas de baixo peso molecular num processo denominado de quelação. Este processo é importante porque diminui os processos de adsorção e precipitação, os quais reduzem a disponibilidade imediata de micronutrientes catiônicos para as plantas. Contudo, ressalta-se que o Cu pode formar complexos estáveis com substâncias húmicas do solo, diminuindo sua disponibilidade para as plantas em solos com elevado teor de matéria orgânica.

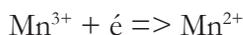
O processo de precipitação, por sua vez, ocorre com Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} e Ni^{2+} quando o pH do solo é elevado. Neste caso ocorre a formação de oxi-hidróxidos insolúveis diminuindo a disponibilidade destes micronutrientes para as plantas como no exemplo a seguir:



No caso de ânions como o MoO_4^{-2} a precipitação ocorre com óxidos de Fe e de Al solúveis em solos ácidos, como mostrado a seguir:



Os processos de oxidação e redução também podem alterar a disponibilidade de micronutrientes para as plantas. Em solos alagados por longos períodos, como é o caso dos cultivos de arroz inundado, os micronutrientes Fe, Mn e Cu sofrem redução, ou seja, ganham elétrons como no exemplo a seguir:



No caso do Fe e do Mn, a redução aumenta os teores solúveis destes micronutrientes para as plantas podendo provocar fitotoxicidade. No caso do Cu, sua redução de Cu^{2+} para Cu^+ provoca deficiência, pois as plantas absorvem o Cu na sua forma bivalente.

No caso da oxidação, ou seja, perda de elétrons, Fe e Mn têm sua disponibilidade reduzida, podendo haver deficiências nutricionais nas plantas. Este processo ocorre em situações de secas, tendo em vista a elevada disponibilidade de oxigênio no solo em detrimento da disponibilidade de água.

A adsorção de micronutrientes ocorre em grupos funcionais da matéria orgânica, argilominerais 1:1, 2:1 e em óxidos de Fe e de Al, como mostrado nas ilustrações a seguir:

- a. Adsorção de molibdênio em Oxi-hidróxido de alumínio
- b. Adsorção de zinco em grupos carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica do solo

EXERCÍCIOS

1. Esquematize as transformações que o enxofre sofre no solo.
2. Explique porque o enxofre adsorvido é pouco importante em solos jovens.
3. Cite algumas culturas exigentes em enxofre.
4. Quais fertilizantes contêm enxofre? A aplicação de 300 kg de sulfato de amônio fornece quantos kg/ha de S?
5. A que você atribui o fato de geralmente não vemos recomendação de doses de Fe, Mn e Cu nos boletins técnicos de recomendação de adubação, sendo mais comuns recomendações para B e Zn?
6. Explique porque em solos ricos em matéria orgânica ocorre há maior risco de deficiência de Cu nas plantas, mas não de Fe, Mn e Zn.
7. Porque há pouca preocupação com Cl na Fertilidade do Solo?
8. Porque em solos com elevado teor de matéria orgânica geralmente não ocorre problemas com deficiência de B?

9. Fale sobre os fatores que interferem na disponibilidade de micronutrientes para as plantas.
10. Cite os principais adubos contendo micronutrientes para as plantas.

7

AMOSTRAGEM PARA DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO

7.1 Aspectos gerais

A amostragem é a primeira (Figura 41) e principal etapa da avaliação do solo para fins de recomendação de adubação e calagem. Neste sentido o laboratório não corrige erros de amostragem, o máximo que se consegue após a amostragem é a precisão dos resultados, pois a amostragem inadequada resulta em análise inexata.

7.2 Conceitos importantes

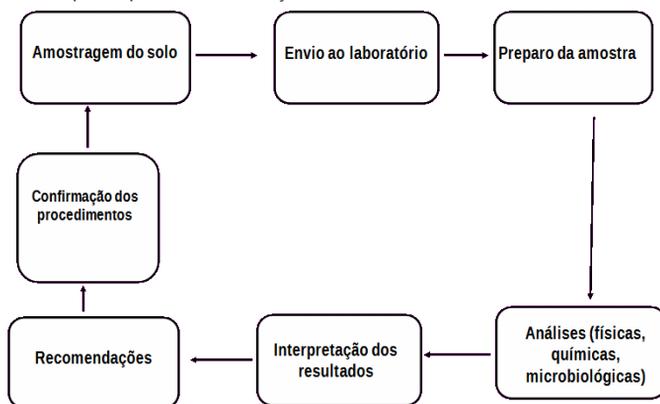
Antes de descrever os procedimentos envolvidos na amostragem, cabe definir alguns conceitos fundamentais.

- **Amostragem do solo:** processo pelo qual, por meio de critérios preestabelecidos, se obtém amostras representativas de uma gleba homogênea para análise química, física, biológica, etc.
- **Amostras simples:** amostras individuais obtidas em diversos pontos da gleba, por meio do caminhamento, que ao final serão reunidas em uma única amostra.

- **Amostra composta:** corresponde a uma massa de cerca de 0,5 kg de terra obtida a partir das subamostras reunidas e homogeneizadas. Este material será encaminhado para o laboratório de solos e representará a gleba ou talhão amostrado para fins de recomendação.
- **Subamostra:** parte da amostra composta que será utilizada no laboratório para uma análise específica. Ex. 10 cm³ de solo para análise de pH.

Para ilustrar os conceitos de exatidão e precisão convém analisar a ilustração abaixo. Se considerarmos que o centro do alvo é o resultado verdadeiro da variável analisado no solo (Figura 42), o terceiro alvo é a situação que se deseja em uma análise de solo, ou seja, que os resultados sejam precisos e exatos. Viés e imprecisão, podem ocorrer quando a amostra composta não for representativa da gleba ou quando o equipamento utilizado não estiver adequadamente calibrado.

Figura 41. Etapas do processo de avaliação da fertilidade do solo.



Fonte: Embrapa (2009).

Figura 42. Situações em que os resultados da análise de solo podem se enquadrar.



Fonte: Autoria própria.

Para se ter ideia da representatividade de uma subamostra no laboratório, suponha uma gleba de 10 ha. O volume total do solo desta gleba na camada de 0 a 20 cm será: 1 ha $\Rightarrow 2 \times 10^6$ dm³ solo $\Rightarrow 10$ ha = 2×10^7 dm³ de solo. Se a subamostra for de 10 cm³, teremos que: $10 \text{ cm}^3 = 0,01 \text{ dm}^3 / 20.000.000 \text{ dm}^3 = 1:2.000.000.000$, portanto para esta análise específica teremos no laboratório uma proporção de 1 parte no laboratório representando dois bilhões de partes no campo.

7.3 Seleção da área

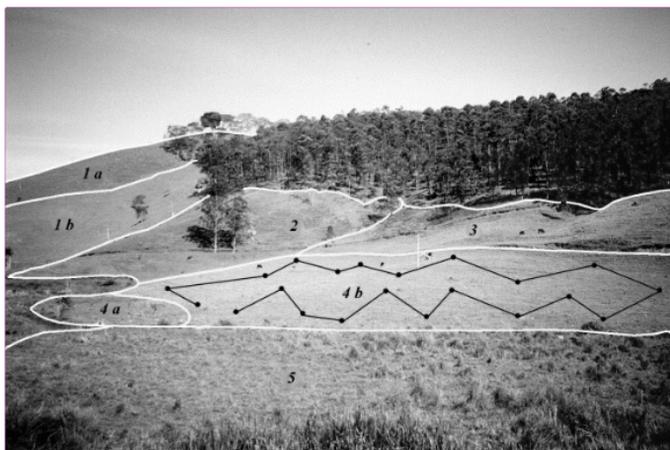
Inicialmente deve-se dividir a área a ser amostrada (Figura 43) em subáreas homogêneas. Para isso, e de posse de um croqui da área, separam-se as subáreas com base em:

- vegetação
- cor e textura
- topografia
- histórico de uso
- tipo de cultura (perene, anual, etc).

Como ilustra a figura 43, os limites de uma gleba de terra para amostragem não devem ser definidos pela área (hectares),

mas, sim, pelas características já enumeradas, que determinam sua homogeneidade. Sugere-se, no entanto, para maior eficiência, não amostrar glebas superiores a 10 ha. Deste modo, glebas muito grandes, mesmo que homogêneas, devem ser divididas em sub-glebas com áreas de até 10 ha. Para fins ilustrativos apenas, a tabela 1 dá uma ideia do tamanho de áreas homogêneas para diversas situações.

Figura 43. Divisão da área em glebas para amostragem de solos.



Fonte: Alvarez *et al.* (1999).

A Figura 43 exemplifica uma eficiente divisão do terreno para amostragem de solos: a gleba 1 representa a encosta íngreme, parte que recebeu calagem (1a) e parte que não recebeu (1b); a 2, a encosta mais suave usada com agricultura esporádica; a gleba 3, pastagem no sopé da encosta; a 4 constitui-se do terraço de relevo suave-ondulado, de coloração mais acinzentada (4a) e de cor mais amarelada (4b); a gleba 5 consiste em pastagem nativa com drenagem deficiente. Na gleba 4b, está representado o sistema de

coleta de amostras simples (21 pontos) para formar uma amostra composta.

O tamanho das subáreas não é fixo, mas não se recomenda estabelecer subáreas com tamanho superior aos mostrados na tabela 18, a fim de se obter uma amostra composta o mais representativa possível.

Tabela 18. Tamanho de subáreas em função dos diversos usos.

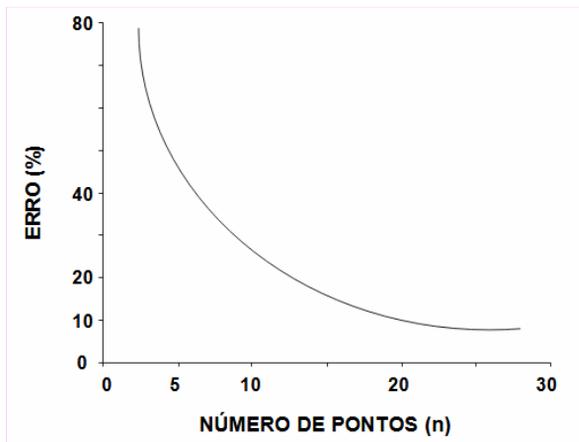
Uso	Subárea (ha)
Pastagem natural	15 a 20
Terreno plano com culturas anuais	2 a 7
Terreno erodido com culturas anuais	1 a 2
Terreno irrigado com culturas anuais	0,5 a 1
Pomar	0,5 a 1
Hortaliças irrigadas	0,5 a 1

Fonte: Alvarez *et al.* (1999).

7.4 Coleta da amostra de solo

Antes da coleta da amostra de solo, é fundamental definir os objetivos e, ou o tipo de cultura que se deseja implantar, pois para algumas situações, como o cultivo de culturas perenes, ou quando a área é analisada pela primeira vez, é necessária uma amostragem diferenciada. Em qualquer caso, o número de amostras simples deve estar entre 20 e 30, pois, de acordo com a figura 44, este é o número em que o erro de amostragem é mínimo. O maior número de amostras simples (30) deve ser coletado em glebas sujeitas à maior heterogeneidade do solo, como pode ocorrer em solos de baixada (aluviais), em solos muito argilosos, em solos sob pastagens ou, então, em solos intensamente cultivados.

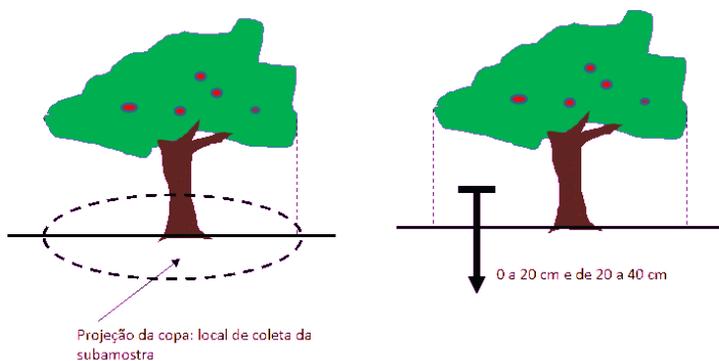
Figura 44. Influência do número de pontos no erro de amostragem do solo.



Outro aspecto fundamental é a distribuição espacial das amostras simples na gleba. As amostras simples devem ser uniformemente distribuídas por toda a gleba, o que é obtido realizando a coleta ao longo de um caminhar em zig-zag pela gleba. A maior eficiência de distribuição dos pontos de coleta é obtida em glebas menores que 10 ha, por isto recomenda-se a subdivisão das glebas muito grandes.

No caso de amostragem de solo em glebas de cultura perene (arbóreas, frutíferas, etc.), os pontos de coleta das amostras simples devem ser localizados na área adubada, em geral, sob a projeção da copa (Figura 45). Havendo interesse em amostrar toda a área, devem-se amostrar separadamente a área adubada na projeção da copa e a área das entrelinhas. Para tanto, coletam-se amostras simples em cada uma das áreas para obter duas amostras compostas distintas.

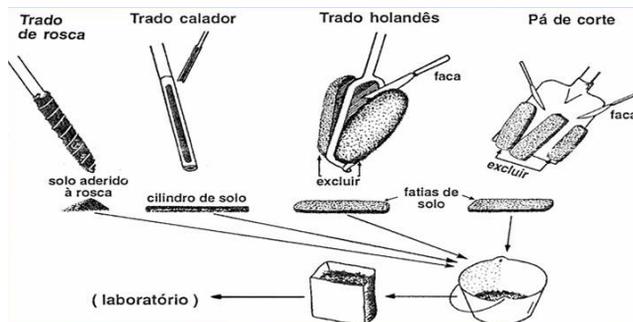
Figura 45. Localização das amostras simples em culturas perenes já instaladas.



Fonte: Autoria própria.

É importante que as amostras simples coletadas em uma gleba tenham o mesmo volume de solo. Isto se consegue padronizando a área e a profundidade de coleta da amostra simples. Obtém-se boa padronização, utilizando os instrumentos denominados trados de amostragem (Figura 46). No entanto, nem sempre é possível a utilização de trados, principalmente em se tratando de solos adensados/compactados e secos, como nos Luvisolos do sertão paraibano. Neste caso, pode-se utilizar com eficiência satisfatória instrumentos mais simples, tais como o enxadeco. Quando se utiliza enxadeco, deve-se abrir um buraco com as paredes verticais (pequena trincheira). Observando-se a profundidade de amostragem, coleta-se a amostra cortando-se fatias para dentro da trincheira e coletando-se em seguida uma porção de solo de cerca de 500 cm³.

Figura 46. Ferramentas mais comuns empregadas para a obtenção das amostras simples.



Fonte: Alvarez *et al.* (1999).

No ponto de coleta das amostras simples, a superfície do solo deverá ser limpa, removendo restos vegetais sem, contudo, remover a camada superficial do solo. Os pontos de coleta das amostras simples não devem ser localizados próximos a acidentes atípicos na área, como por exemplo, cupinzeiros, local de queimadas de restos culturais, local de deposição de fezes e cochos ou saleiros em áreas de pastagens.

7.5 Profundidade de amostragem

Em relação a profundidade de amostragem adota-se o seguinte critério:

- Regra geral: profundidade de exploração das raízes das plantas
- Culturas anuais: 0-20 cm (0-20 cm e 20-40 cm na 1ª vez)
- Culturas perenes (exceto pastagens): 0-20 cm e 20-40 cm
- Espécies florestais: 0-30 cm e 30-60.

A amostragem em profundidade, ou seja, superior a zona de exploração do sistema radicular é útil para se obter informações

acerca de possíveis barreiras físicas ao desenvolvimento das plantas, como camadas compactadas ou adensadas, presença de barreira química, como o excesso de alumínio e excesso de elementos móveis no solo como NO_3^- , SO_4^{2-} e K^+ .

7.6 Processamento das Amostras

As amostras simples devem ser reunidas em um recipiente limpo, como um balde plástico. Devem-se evitar recipientes metálicos, principalmente aqueles galvanizados, que podem acarretar contaminação das amostras, recomendando-se, preferencialmente, recipientes de plástico. O volume de solo das amostras simples deve ser cuidadosamente destorroado e perfeitamente homogeneizado, para obter uma amostra composta representativa, que deve ser constituída por um volume aproximado de 300 cm^3 . Este volume de solo pode ser seco à sombra e depois enviado ao laboratório. Não se recomenda que o solo da amostra composta seja peneirado.

O volume de solo da amostra composta deve ser acondicionado em saco plástico limpo, ou em caixas de papelão apropriadas. A amostra composta deve ser devidamente identificada de modo que os resultados possam ser relacionados com as respectivas glebas. As etiquetas devem ser escritas a lápis e protegidas perfeitamente com plástico para que a umidade da amostra do solo não as deteriore. Assim, a etiqueta deve ficar entre dois sacos plásticos.

Além disso, é importante que seja fornecido ao laboratório o nome do proprietário, o município e o nome da propriedade. Quando o laboratório apresenta sugestões de correção e de aducação, outras informações devem ser prestadas, como a cultura que será implantada ou manejada conforme formulário abaixo.

Nome do proprietário _____		
Propriedade _____		
Endereço _____		
E-mail _____		
Telefone _____		
CEP _____	Município _____	Estado _____
Nº da amostra _____	Adubação anterior? _____ kg/ha de _____	
Cultura anterior _____	Cultura atual/cobertura vegetal _____	Cultura a ser implantada _____

7.7 Frequência de amostragem

A frequência de amostragem dependerá do manejo adotado no solo e das culturas a serem exploradas. Como regra geral orienta-se aos produtores que, para áreas exploradas com culturas anuais de ciclo e que permanecem em pousio na época seca, a amostragem deve ser realizada a cada três anos. Entretanto, para produtores altamente tecnificados, com rotação de culturas ou em áreas cultivadas com culturas perenes com altas doses de nutrientes e de calcário a amostragem deve ser anual ou a cada ciclo produtivo.

Em qualquer das situações acima mencionadas, é sempre importante realizar a amostragem do solo com antecedência de pelo menos três meses antes do plantio, considerando o tempo necessário para a obtenção dos resultados, o tempo necessário para a aquisição, aplicação e reação dos corretivos e fertilizantes. Quando se deseja utilizar um calcário de baixo PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total) o tempo mínimo entre a coleta do solo e o plantio deve ser de seis meses.

8

INTERPRETAÇÃO DA ANÁLISE DE SOLO

8.1 Unidades usuais em fertilidade do solo

É muito frequente as dúvidas sobre as unidades de representação dos resultados da análise de solo, principalmente quando se trata daquelas que já consideradas obsoletas, mas que muitas vezes aparecem em algumas análises de solo ou em livros de fertilidade do solo mais antigo.

Em 1960 foi aprovado em Paris o Sistema Internacional de Unidades (SI), o qual tem sido regulamentado por diversas entidades internacionais, com o objetivo de padronizar as unidades adotadas nos diversos ramos da ciência, a exemplo da fertilidade do solo e nutrição de plantas.

O Brasil passou a adotar o SI em 1980, o qual é, atualmente, reconhecido como oficial, sendo que a sua regulamentação compete ao Instituto Nacional de Peso e Medidas (INPM). No entanto, sua adoção pelo meio técnico-científico é ainda irregular. Na Ciência do Solo, especificamente, o SI foi oficialmente adotado a partir

de 1993, por ocasião da realização do XXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, em Goiânia.

a) Unidades do SI diretamente relacionadas ao solo, fertilizantes e corretivos

Abaixo encontram-se algumas das unidades usuais em fertilidade do solo, incluindo as grandezas a que pertencem e o respectivo símbolo (Tabelas 19, 20) e 21.

Tabela 19. Unidades relativas às grandezas mais utilizadas em fertilidade do solo

Grandeza	Unidade	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Temperatura	Kelvin	K
Quantidade de matéria	mol	mol
Área	-	m ²
Volume	-	m ³
Densidade	-	kg/m ³
Volume específico	-	m ³ /kg
Concentração	-	mol/m ³

Tabela 20. Prefixos recomendados pelo SI mais empregados em fertilidade do solo.

Fator multiplicativo	Prefixo	Símbolo	Fator multiplicativo	Prefixo	Símbolo
10 ⁻⁹	nano	n	10 ¹	deca	da
10 ⁻⁶	micro	μ	10 ²	hecto	h
10 ⁻³	mili	m	10 ³	quilo	k
10 ⁻²	centi	c	10 ⁶	mega	M
10 ⁻¹	deci	d	10 ⁹	giga	G

Tabela 21. Unidades que não fazem parte do SI, mas de uso comum em fertilidade do solo.

Grandeza	Unidades	Símbolo	Equivalente ao SI
Tempo	minuto	min	60 s
	hora	h	3.600 s
	dia	d	86.400 s
volume	litro	L	1 L = $\text{dm}^3 = 10^{-3} \text{m}^3$
massa	tonelada	t	$10^3 \text{kg} = 1.000 \text{kg}$
área	hectare	ha	10.000m^2
comprimento	Angstron	Å	10^{-9}m
Comprimento	Microm	μ	10^{-6}m

b) Múltiplos e submúltiplos

Constantemente nos deparamos com a necessidade de converter as unidades do SI (ou diferente do SI) em seus múltiplos ou submúltiplos. Essa necessidade decorre da variação da magnitude que os valores de determinada unidade podem assumir. Assim, quando se trabalha com pequenos volumes em análises de solo, geralmente os volumes são medidos em mililitros (mL), ao passo quando se trabalha com água para o preparo de calda para adubação foliar os volumes são medidos em litros. Uma maneira simples de se realizar estas conversões encontram-se nos esquemas abaixo.

De acordo com o esquema acima converte-se metro (m) para milímetro (mm) dividindo-se o valor correspondente em metro por 0,001, ou seja, 1,0 m corresponde a $1/0,001 = 1.000 \text{mm}$ e $1,0 \text{m} = 1/0,01 = 100 \text{cm}$ e assim por diante.

No segundo esquema abaixo é possível converter para múltiplos e submúltiplos das unidades derivadas de área de volume. Desta forma $1,0 \text{m}^2$ corresponde a $1/10^{-4} = 10.000 \text{cm}^2$ e $1,0 \text{m}^3 = 1/10^{-6} = 1.000.000 \text{cm}^3$. Estas conversões podem ser facilmente demonstradas tomando como referências as unidades básicas e os conceitos de área e volume. Assim, $1,0 \text{m}^2$ resulta do produto $1,0$

$m \times 1,0 \text{ m} = 1,0 \text{ m}^2$; se $1,0 \text{ m} = 100 \text{ cm}$, então $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} = 10.000 \text{ cm}^2$. Da mesma forma, se 1 m^3 resulta do produto $1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$, então $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} = 1.000.000 \text{ cm}^3$. Este raciocínio pode ser empregado para qualquer outra conversão de unidade e corresponde a base para a elaboração dos esquemas apresentados.

Uma das grandezas mais evidentes em análises de solo, plantas e corretivos é a concentração, a qual é expressa em quantidade de matéria por unidade de volume, ou por unidade de massa. No SI a quantidade de matéria é representada pela grandeza. Quando se conhece a composição química da matéria (NaCl, por exemplo) a quantidade de matéria é expressa pelo mol. Quando sua composição, no entanto, não é conhecida (matéria orgânica do solo, por exemplo) utiliza-se as unidades de massa para expressar a quantidade de matéria. O mol é definido como a quantidade de matéria de um sistema que contém as mesmas unidades elementares, quantas forem os átomos contidos em 12 g do ^{12}C .

A massa de qualquer quantidade de matéria correspondente a um mol ($6,022 \times 10^{23}$ entidades) é denominada de **massa molar** (M). Tem-se, portanto, a massa molar para moléculas - **massa molecular** - (p. ex. $\text{CO}_2 = 44 \text{ g/mol}$), para elementos - **massa atômica** - (p. ex. $\text{Na} = 23 \text{ g/mol}$) e também para íons (p.ex. $\text{H}^+ = 1,0 \text{ g/mol}$), para elétrons e outros. Deste modo, o termo peso atômico e peso molecular estão em desuso. Para facilitar o entendimento deste conceito, suponha que é possível juntarmos $6,022 \times 10^{23}$ átomos de Ca (cálcio), um a um; estes átomos colocados em uma balança pesariam 40 g ou seja, a própria massa atômica do elemento cálcio. O mesmo raciocínio pode ser empregado para outras entidades, ou seja, se fossemos capazes de separar $6,022 \times 10^{23}$ moléculas de NaCl e colocarmos numa balança, a massa destas moléculas seriam de $58,5 \text{ g}$ ($23 + 35,5$), ou seja, a própria massa molar do NaCl.

c) Resultados de análises de solo

Em análises de solo o uso de submúltiplos do mol (cmol, mmol e μmol) nas unidades de concentração é mais comum que o mol. Entretanto, nestes casos, para expressar concentração de íons utiliza-se o conceito de mol_c (mol de carga). Este conceito é derivado de um conceito mais usual na química analítica conhecido como equivalente-grama (eq.g) ou normalidade (N). Assim, 1,0 equivalente do íon cálcio corresponderia a $40\text{g}/2 = 20\text{g}$, ou seja, a relação entre a massa atômica e a valência do íon. No caso de bases e ácidos o eq.g corresponde à relação entre a massa molar da substância e o número de hidrogênio ou hidroxila ionizável. Exemplificando com HCl, 1 eq.g desse ácido teria $36,5\text{g}/1 = 36,5\text{g}$ de HCl = 1N. Da mesma forma, 1eq-g de H_2SO_4 teria $98/2 = 49\text{g} = 1\text{N}$. Tanto normalidade quanto equivalente-grama são unidades obsoletas e atualmente o mol_c e seus submúltiplos são as unidades aceitas no SI. Pelo exposto pode-se dizer que $1,0 \text{ eq-g} = 1,0 \text{ mol}_c$ em qualquer caso, e que $1\text{N} = 1,0 \text{ eq-g} = 1,0 \text{ mol}_c$ no caso de ácidos e bases. A Tabela 22 ilustra algumas conversões de unidades envolvendo o mol_c e seus submúltiplos mais comuns em análises de solo.

Tabela 22. Variações da unidade mol mais utilizadas em análises de solos.

íon	mol	mol_c	cmol_c	mmol_c	μmol_c	massa (g)
Ca^{2+}	1,0	2,0	200	2.000	2.000.000	40,0
Mg^{2+}	1,0	2,0	200	2.000	2.000.000	24,3
K^+	1,0	1,0	100	1.000	1.000.000	39,0
Na^+	1,0	1,0	100	1.000	1.000.000	23,0
Al^{3+}	1,0	3,0	300	3.000	3.000.000	27,0
N_NH_4^+	1,0	1,0	100	1.000	1.000.000	14,0
N_NO_3^-	1,0	1,0	100	1.000	1.000.000	14,0

N_NH_4^+ = nitrogênio na forma de amônio

Quando se trata de unidades de concentração, há apenas que se fazer as devidas conversões do numerador e do denominador (Tabela 22). Por exemplo, qual é o valor que corresponde a 25 mmol/L de Ca^{2+} em cmol/L de Ca^{2+} ? Resposta: $25/10 = 2,5$ cmol/L de Ca^{2+} . Portanto, se a unidade do denominador for a mesma, converte-se apenas o numerador.

É muito comum aparecer em artigos e em livros antigos sobre fertilidade do solo a unidade miliequivalente (meq)/100g. Neste caso eq-grama = mol, então meq = mmol. Deduz-se que $1\text{meq}/100\text{g} = 1,0\text{mmol}/0,1\text{kg} = 10\text{mmol}/\text{kg} = 1,0\text{cmol}/\text{kg}$, pois $10\text{mmol} = 1,0\text{cmol}$.

Dessas unidades resulta que $\text{mg} = \text{massa atômica} \times \text{mmol}$ ou $\text{mg}/\text{L} = \text{massa atômica} \times \text{mmol}/\text{L}$ ou ainda que $\text{mg}/\text{L} = (\text{mmol}/\text{L} \times \text{massa atômica})/\text{valência}$. Lembrando que mg/L ou mg/kg ou mg/dm^3 também é referida como ppm (partes por milhão).

Finalmente cabe destacar que às vezes deseja-se saber a quantidade disponível de nutrientes em um volume de solo correspondente a um hectare. Um hectare na camada de 0-20 cm corresponde a um volume de $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 0,2\text{ m} = 2.000\text{ m}^3$ de terra, ou $2.000.000\text{ dm}^3$ de terra. Assim um solo que apresenta $5,0\text{ mg de P}/\text{dm}^3$ de solo na camada de 0-20 cm, contém $2.000.000 \times 5 = 10.000.000\text{ mg de P}/\text{ha}$ ou $10\text{ kg de P}/\text{ha}$, ou seja:

$$\text{kg/ha} = \text{mg}/\text{dm}^3 \times 2$$

c) Resultados de análises de tecidos vegetais, fertilizantes e corretivos

Em se tratando de tecidos vegetais, da mesma forma como ocorre com as análises de solo, a literatura mais antiga, geralmente apresenta os teores de macronutrientes em porcentagem e os de micronutrientes em mg/kg. No segundo caso, os valores se

encontram no SI, mas no primeiro não. Para se converter porcentagem (%) em unidades do SI como g/kg, multiplica-se o valor correspondente em porcentagem por 10. Assim **1% = 10g/kg**, pois, **1% = 1g/100g = 1g/0,1kg = 10g/kg**. Portanto, pode-se deduzir que 1% corresponde a 10.000 ppm ou 10.000 mg/kg. É interessante que no Boletim técnico do Estado de Minas Gerais os valores expressos em porcentagem passaram para SI sem alterar a magnitude dos valores, apenas utilizando a unidade dag/kg (dag = decagrama = 10g) ou dag/dm³. Portanto, **1% = 10g/kg = 1dag/kg**.

No caso de corretivos e fertilizantes, os teores da maioria dos elementos químicos são expressos em porcentagem (não aceita no SI) do óxido correspondente, como por exemplo os teores de Ca e Mg nos calcários são expressos em %CaO e %MgO e os teores de P e K nos fertilizantes são expressos em %P₂O₅ e %K₂O. Esta forma de expressar a concentração destes elementos, provavelmente é derivado da química analítica que no passado expressava a concentração de qualquer elemento químico na forma de óxidos tendo em vista que os materiais analisados eram calcinados (queimados) antes de sua quantificação.

Apesar de as recomendações de adubação expressarem as doses em P₂O₅ e K₂O, em adubações de vasos, as recomendações geralmente utilizam a unidade mg/dm³. Suponha que para um experimento em vasos com solo foram recomendadas 300 mg de P/dm³ de solo na forma de superfosfato simples (18% P₂O₅). Assim teremos o seguinte cálculo:

$$18\% \text{ P}_2\text{O}_5 = 18 \times 10 = 180 \text{ g/kg P}_2\text{O}_5 = 180 \text{ mg/g P}_2\text{O}_5$$

$$\text{Massa molecular do P}_2\text{O}_5 = 142$$

$$\text{Então } 142 \text{ g de P}_2\text{O}_5 \text{ ————— } 2 \times 31 \text{ g de P}$$

$$180 \text{ g de P}_2\text{O}_5 \text{ ————— } X = 78,591 \text{ g de P}$$

Daí surge o fator de conversão de P_2O_5 para $P = 0,4366$; portanto $180 \times 0,4366 = 78,591$. Para facilitar os cálculos do problema proposto, pode-se ainda dizer que $78,591\text{g/kg} = 78,591\text{mg/g}$. Assim teremos:

$$\begin{array}{r} 78,591 \text{ mg de P} \text{ ————— } 1,0 \text{ g de superfosfato simples} \\ 300 \text{ mg de P} \text{ ————— } \mathbf{X = 3,817 \text{ g de superfosfato}} \\ \text{simples} \end{array}$$

Portanto, para converter mg de P para mg de fertilizante fosfatado pode-se utilizar a seguinte expressão derivada do cálculo realizado acima:

$$\mathbf{dF = (dP/0,4366) \times [(1/(\% P_{205} / 100))]}$$

Em que dF = dose do fertilizante em mg e dP = dose de fósforo em mg.

Para o potássio (K) pode-se utilizar o mesmo raciocínio. Assim, suponha que para um experimento em vasos com solo foram recomendadas 150 mg de K/dm^3 na forma de cloreto de potássio (58% K_2O). Assim teremos o seguinte cálculo:

$$58\% K_2O = 58 \times 10 = 580\text{g/kg } K_2O$$

Massa molecular do $K_2O = 94$

$$\text{Então } 94\text{g de } K_2O \text{ ————— } 2 \times 39\text{g de K}$$

$$580 \text{ g de } K_2O \text{ ————— } X = 481,276\text{g de K}$$

Daí surge o fator de conversão de K_2O para $K = 0,829787$; portanto $580 \times 0,829787 = 481,276$. Para facilitar os cálculos do problema proposto, pode-se ainda dizer que $481,276\text{g/kg} = 481,276 \text{ mg/g}$. Assim teremos:

$$\begin{array}{r}
 481,276 \text{ mg de K} \text{ ————— } 1,0 \text{ g de cloreto de potássio} \\
 150 \text{ mg de K} \text{ ————— } \mathbf{X = 0,312 \text{ g de cloreto de potássio}}
 \end{array}$$

Portanto, para converter mg de K para mg de fertilizante potássico pode-se utilizar a seguinte expressão derivada do cálculo realizado acima:

$$\mathbf{dF = (dk/0,83) \times [(1/(\% K20 /100))]}$$

Em que dF = dose do fertilizante em mg e dK = dose de potássio em mg.

Nos demais casos como os teores totais em análises de fertilizantes e de solo a exemplo de CaO, MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃ etc. emprega-se o mesmo raciocínio empregado acima, além disso, pode utilizar o raciocínio inverso. Por exemplo: Qual a percentagem de óxido de MgO num calcário que contém 5% de Mg?

Cálculo:

Massa molecular do MgO = 40

$$40\text{g de MgO} \text{ ————— } 24\text{g de Mg}$$

$$100 \text{ g de MgO} \text{ ————— } \mathbf{X = 60\text{g} = 60\%}$$

$$100 \text{ g de MgO} \text{ ————— } 60\text{g Mg}$$

$$x \text{ ————— } 5\text{g Mg}$$

$$\mathbf{X = 8,3\% \text{ MgO}}$$

Para facilitar pode-se utilizar a seguinte expressão:

$$\% \acute{\text{O}}\text{xido} = (\% \text{ do elemento no material analisado}) / (\text{Pa} / \text{M})$$

Assim: $\% \text{MgO} = (5) / (24 / 40) = 8,3\%$

Pa = massa atômica do Mg e M = massa molar do MgO

8.2 Tabelas de interpretação dos resultados

No Brasil existem diversas tabelas de interpretação da análise de solo, que embora apresentem semelhanças, cada uma apresenta as particularidades do Estado onde foram desenvolvidas. Devido a falta de informação mais precisa para os estados do Nordeste como um todo, será apresentado, a título de exemplo, as tabelas de interpretação da análise de solo (Tabelas de I a VI) utilizadas pelo Estado de Minas Gerais (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Tabela I. Classes de interpretação para a acidez ativa do solo (pH)¹

Classificação química						
Acidez				Neutro	Alcalinidade	
Muito Elevada	Elevada	Média	Fraca		Fraca	Elevada
< 4,5	4,5 - 5,0	5,1 - 6,0	6,1 - 6,9	7,0	7,1 - 7,8	> 7,8

⁽¹⁾ pH em água na relação 1:2,5, TFSA

Classificação agrônômica				
Muito baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito alto
< 4,5	4,5 - 5,4	5,5 - 6,0	6,1 - 7,0	> 7,0

Tabela II. Classes de interpretação da análise de solo para a matéria orgânica e para os teores dos principais cátions do solo (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Atributo	Unidade	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio ²	Bom	Muito bom
C.O (3)	dag/kg	≤ 0,40	0,41-1,16	1,17- 2,32	2,33 -4,06	> 4,06

Atributo	Unidade	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio ²	Bom	Muito bom
M.O (3)	dag/kg	≤0,70	0,71 - 2,00	2,01- 4,00	4,01 - 7,00	>7,00
Ca ²⁺ (4)	cmol _c /dm ³	≤0,40	0,41- 1,20	1,21 - 2,40	2,41 -4,00	> 4,00
Mg ²⁺ (4)	cmol _c /dm ³	≤0,15	0,16- 0,45	0,46 - 0,90	0,91 - 1,50	>1,50
Al ³⁺ (4)	cmol _c /dm ³	≤0,20	0,21 - 0,50	0,51- 1,00	1,01 - 2,00	> 2,00

C.O =carbono orgânico; M.O = matéria orgânica

(1) dag/kg = % (m/m); cmol_c/dm³ = meq/100cm³; (2) O limite superior desta classe indica o nível crítico. (3) Método Walkley & Black; M. O. = 1,724 x C. O.; (4) Método KCl 1 mol/L; (5) A interpretação desta característica, nestas classes, deve ser Alta e Muito alta em lugar de Bom e Muito bom.

Tabela III. Classes de interpretação da análise de solo para alguns índices relacionados ao complexo de troca (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Atributo	Unidade ¹	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio ²	Bom	Muito bom
SB ⁽³⁾	dag/kg	≤0,60	0,61 - 1,80	1,81- 3,60	3,61- 6,00	> 6,0
H + Al ⁽⁴⁾	cmol _c /dm ³	≤1,00	1,01 - 2,50	2,51 - 5,00	5,01 - 9,00	>9,0
CTC efetiva (t) ⁽⁵⁾	cmol _c /dm ³	≤0,80	2,51 - 5,00	2,31- 4,60	4,61 -8,00	> 8,00
CTC ⁽⁶⁾ a pH 7,0	cmol _c /dm ³	≤0,160	0,81- 2,30	4,31- 8,60	8,61 - 15,0	>15,0
m ⁽⁷⁾	cmol _c /dm ³	≤15,0	1,61- 4,30	30,1- 50,0	50,1- 75,0	>75,0
V(8)	%	≤20,0	15,1- 30,0	40,1- 60,0	60,1- 80,0	> 8,0

(1) cmol_c/dm³ = meq/100 cm³; (2) O limite superior desta classe indica o nível crítico; (3) SB = Ca+Mg+K+Na. (4) H+AL_s, Método Ca(OAc)₂ 0,5 mol/L, pH 7. (5) t = SB + Al³⁺. (6) T = SB + (H+Al). (7) m = 100 Al³⁺/ t. (8) V = 100 SB/T. (9) A interpretação desta característica, nestas classes, deve ser Alta e Muito Alta em lugar de Bom e Muito bom.

Além dos índices acima, é interessante conhecer também a relação entre as bases Ca, Mg e K para evitar problemas de desequilíbrios nutricionais proporcionados por inibição competitiva. Para isso calcula-se as relações: %Ca = (Ca/t)x100; %Mg = (Mg/t)x100 e (K/t)x100. Em geral adora-se com adequados as seguintes faixas:

Base	Faixa adequada (%)
Ca	60 - 70
Mg	10 - 20
K	2 - 5

Tabela IV. Classes de interpretação da disponibilidade para fósforo de acordo com o teor de argila do solo ou do valor de fósforo remanescente (P-rem) e para o potássio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

CLASSIFICAÇÃO					
Característica	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
----- (mg/dm ³) ^{1/} -----					
Argila (%)		Fósforo disponível (P) ^{2/}			
60-100	≤ 2,7	2,8-5,4	5,5-8,0 ^{3/}	8,1-12,0	> 12,0
35-60	≤ 4,0	4,1-8,0	8,1-12,0	12,1-18,0	> 18,0
15-35	≤ 6,6	6,7-12,0	12,1-20,0	20,1-30,0	> 30,0
0-15	≤ 10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-45,0	> 45,0
P-rem ^{4/} (mg/L)					
0 - 4	≤ 3,0	3,1-4,3	4,4-6,0 ^{3/}	6,1-9,0	> 9,0
4-10	≤ 4,0	4,1-6,0	6,1-8,3	8,4-12,5	> 12,5
10-19	≤ 6,0	6,1-8,3	8,4-11,4	11,5-17,5	> 17,5
19-30	≤ 8,0	8,1-11,4	11,5-15,8	15,9-24,0	> 24,0
30-44	≤ 11,0	11,1-15,8	15,9-21,8	21,9-33,0	> 33,0
44-60	< 15,0	15,1-21,8	21,9-30,0	30,1-45,0	> 45,0
Potássio disponível ^{2/}					
	≤ 15	16 - 40	41 - 70	71- 120	> 120

^{1/} mg/dm³ = ppm (m/v). ^{2/} Método Mehlich-1. ^{3/} Nesta classe apresentam-se os níveis críticos de acordo com o teor de argila ou com o valor do fósforo remanescente. ^{4/} P-rem = Fósforo remanescente, concentração de fósforo da solução de equilíbrio após

agitar durante 1 h a TFSA com solução de CaCl_2 10 mmol/L, contendo 60 mg/L de P, na relação 1:10.

Tabela V. Classes de interpretação da disponibilidade para enxofre de acordo com o valor de fósforo remanescente

	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
0 - 4	$\leq 1,7$	1,8 - 2,5	2,6 - 3,6	3,7 - 5,4	$> 5,4$
4 - 10	$\leq 2,4$	2,5 - 3,6	3,7 - 5,0	5,1 - 7,5	$> 7,5$
10 - 19	$\leq 3,3$	3,4 - 5,0	5,1 - 6,9	7,0 - 10,3	$> 10,3$
19 - 30	$\leq 4,6$	4,7 - 6,9	7,0 - 9,4	9,5 - 14,2	$> 14,2$
30 - 44	$\leq 6,4$	6,5 - 9,4	9,5 - 13,0	13,1 - 19,6	$> 19,6$
44 - 60	$\leq 8,9$	9,0 - 13,0	13,1 - 18,0	18,1 - 27,0	$> 27,0$

⁽¹⁾ Método Hoefl et al. (1973) $\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2$, 500 mg/L de P, em HOAc 2,0 mol/L. ⁽²⁾ Esta classe indica os níveis de acordo com o valor de P-remanescente.

Tabela VI. Classes de interpretação da disponibilidade para micronutrientes (ALVAREZ et al., 1999).

Micronutrientes	Teor no solo				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Alto
-----mg/dm ³ -----					
Boro	$\leq 0,15$	0,16- 0,35	0,36 -0,60	0,61 - 0,90	$> 0,90$
Cobre	$\leq 0,30$	0,40 -0,70	0,8 - 1,2	1,3 - 1,8	$> 1,8$
Ferro	$\leq 8,0$	9,0 - 18,0	19 - 30	31- 45	> 45
Manganês	$\leq 2,0$	3,0 - 5,0	6,0 - 8,0	9,0 - 12	> 12
Zinco	$\leq 0,4$	0,5 - 0,9	1,0 - 1,5	1,6 - 2,2	$> 2,2$

Extratores: (1) Boro = água quente; (2) Cu. Fe. Mn. Zn = Mehlich-1

8.3 Recomendação de adubação

a) *Uso de tabelas de recomendação*

A recomendação de fertilizantes é um processo relativamente simples e até certo ponto mecânico, pois para isto basta apenas

esta de posse de um boletim de recomendação do Estado em que se deseja realizar a adubação e o resultado da análise de solo.

O Estado da Paraíba não tem um Boletim de recomendação de adubação atualizado, sendo a última versão do ano de 1979. Portanto, é muito comum em nosso Estado os produtores utilizarem o Boletim do Estado de Pernambuco (Cavalcanti *et al.*, 2008) para procederem com a recomendação de adubação, tendo em vista a semelhança de solos e clima entre estes estados. Assim, para o exemplo a seguir será empregado o Boletim do Estado de Pernambuco.

Suponha que um solo coletado na camada de 0 - 20 cm apresentou os seguintes atributos: pH (CaCl_2) = 7,5; P = 2,6 mg dm^{-3} ; K^+ = 0,15 cmolc dm^{-3} ; Ca^{2+} = 17,3 cmolc dm^{-3} ; Mg^{2+} = 4,8 cmolc dm^{-3} ; Cu=0,20 mg dm^{-3} ; Fe=6,25 mg dm^{-3} ; Mn=36,0 mg dm^{-3} ; Zn= 4,3 mg dm^{-3} ; Na^+ = 0,4 cmolc dm^{-3} ; Al^{3+} = 0,1 cmolc dm^{-3} ; H^+ + Al^{3+} = 1,0 cmolc dm^{-3} ; matéria orgânica = 13,6 g kg^{-1} ; areia = 311 g kg^{-1} ; silte = 446,6 g kg^{-1} ; argila = 241,7 g kg^{-1} . Considerando estes resultados **qual é a recomendação de adubação e calagem para o meloeiro irrigado?** Tomando-se o Boletim do Estado de Pernambuco (Cavalcanti *et al.*, 2008) as recomendações seriam as apresentadas a seguir.

Considerando o pH, os teores de Ca, Mg, observa-se que não há necessidade de calagem para o solo em questão. Em relação aos micronutrientes a interpretação seria que Zn, Fe, e B estariam em níveis altos e Cu em nível muito baixo. De acordo com o Boletim do Estado de Pernambuco, assim como ocorre em outros, não há recomendação de Cu com base na análise de solo. Entretanto, considerando o pH do solo, seria recomendável uma adubação foliar com uma fonte de cobre (sulfato de cobre ou cloreto de cobre). Neste caso, uma ou duas aplicações de sulfato de cobre na dose de 2 kg/400L por hectare poderia resolver o problema.

No caso de N, P e K, as recomendações seriam: **N => 40 kg /ha no plantio e 80 kg/ha em cobertura** (dividir em duas aplicações, uma aos 20 e outra aos 40 dias após o plantio), **P2O5 => 160 kg/ha todo em fundação e K2O => 40 kg/ha no plantio e 80 kg/ha em cobertura (dividir em duas aplicações, uma aos 20 e outra aos 40 dias após o plantio)**. O próximo passo é a escolha das fontes a serem utilizadas. Escolhendo-se ureia, MAP e cloreto de potássio como fonte de N, P e K, respectivamente teremos a seguinte recomendação: $MAP = 160/0,48 = 333,3\text{kg/ha}$. Lembrar que o MAP tem 9% de N e portanto $333,3 \text{ kg de MAP tem } 333,3 \times 0,09 = 30 \text{ kg de N}$. Portanto, no plantio teremos que descontar o N do MAP e completar com outra fonte (neste caso com uréia). Então $40 - 30 = 10\text{kg/ha de N na forma de uréia} = 10/0,45 = 22,2 \text{ kg/ha de uréia no plantio}$. Para o K teremos que aplicar no plantio $40/0,48 = 69,0 \text{ kg/ha}$ e duas coberturas de 40 kg/ha (Tabela 23).

Tabela 23. Recomendação de adubação para a cultura do meloeiro irrigado.

Fertilizante	Quantidade (kg/ha)		
	Plantio	1ª Cobertura	2ª Cobertura
MAP	333,3	-	-
Cloreto de potássio	69,0	69,0	69,0
Ureia	22,2	89,0	89,0

Nos Estados do Rio Grande do Sul, a adubação nitrogenada do milho é realizada considerando o teor de matéria orgânica e a produtividade esperada como se vê na Tabela 24.

Tabela 24. Quantidades de nitrogênio para adubação do milho nos estados do RS e SC.

Teor de M.O (%)	Expectativas de rendimento		
	< 3t/ha	3-6t/ha	> 6t/ha
	kg/ha		
≤ 2,5	80	130	160
2,6-3,5	70	110	140
3,6-4,5	60	90	120
4,6-5,5	50	80	100
> 5,5	≤ 40	≤ 65	≤ 80

No estado de São Paulo a adubação nitrogenada do milho leva em consideração a produtividade esperada e a classe de resposta conforme ilustra a Tabela 25.

Tabela 25. Quantidades totais de nitrogênio para adubação do milho no estado de SP.

Produtividade (t/ha) esperada	Classe de resposta a nitrogênio		
	1	2	3
	----- kg/ha -----		
2-4	50	30	20
4-6	80	60	40
6-8	120	90	60
8-10	150	120	80
10-12	170	140	100

- 1- Alta resposta esperada: solos corrigidos, com muitos anos de plantio contínuo de gramíneas.
- 2- Média resposta esperada: solos muito ácidos que serão corrigidos: com plantio anterior com leguminosas.
- 3- Baixa resposta esperada: solos em pousio por 2 anos ou mais, ou após pastagem; cultivo intenso com leguminosas

b) Método baseado no balanço nutricional

O balanço nutricional, genericamente, pode ser obtido pela diferença entre o requerimento total de cada nutriente pela cultura

e o suprimento pelo solo e por fontes externas como a adubação (Silva *et al.*, 2008).

O requerimento pela cultura pode ser obtido pelas quantidades acumuladas em cada parte da planta, levando-se em consideração o que é restituído ao solo na forma de resíduos da parte aérea e raízes, assim como a eficiência de recuperação do respectivo nutriente. A determinação do suprimento de nutrientes pelo solo, por sua vez, não é uma tarefa fácil, devido às diversas transformações que cada um sofre no solo. Contudo, muitos trabalhos foram realizados neste sentido, onde foram estabelecidas relações entre os teores dos nutrientes disponíveis no solo com sua quantidade disponível para a planta, considerando, além dos teores disponíveis, atributos do solo como teor de argila, fósforo remanescente e taxa de mineralização de nitrogênio no solo (Possamai, 2003; Santos Neto, 2003; Oliveira *et al.*, 2005; Santos *et al.*, 2008)..

Neste sentido, vários trabalhos foram realizados com diversas culturas, visando determinar o balanço nutricional (BN), ou seja, as quantidades de nutrientes a serem restituídas ao solo. Este procedimento é uma alternativa aos métodos oficiais de recomendação de adubação, que utilizam tabelas estabelecidas com base em estudos de correção e calibração da análise de solo. No Brasil, estes trabalhos foram orientado principalmente por pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa (Possamai, 2003; Oliveira *et al.*, 2005; Carvalho *et al.*, 2006; Santos *et al.*, 2008; Silva, *et al.*, 2009), os quais desenvolveram um sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para diversas culturas, denominado genericamente de FERTCALC®, baseando-se no balanço nutricional. Desta forma o FERTCALC® tem com base as seguintes expressões:

$$\mathbf{BN = SUPtotal - REQtotal}$$

$$REQ_{total} = REQ_{planta}/ER + DEMSust \quad SUP_{total} = SUP_{solo} + SUP_{fert}$$

$$SUP_{solo} = (NP \times Lb \times P \times TAS/TR)/1.000$$

Onde:

REQ_{total} = requerimento total do nutriente pela cultura em kg/ha; REQ_{planta} = quantidade de cada nutriente extraída pela planta

$DEMSust$ = demanda de sustentabilidade (Corresponde a 40% da demanda nutricional da fração a ser exportada, no caso do nitrogênio. Para os demais nutrientes, o valor é de 60%).

ER = é a eficiência de recuperação do nutriente pela planta;

SUP_{total} = Suprimento total em kg/ha;

SUP_{solo} = Quantidade do nutriente suprida pelo solo, em kg/ha, calculado com base na análise de solo e considerando a camada de 0 - 20cm e a área ocupada por cada planta

SUP_{fert} = Suprimento do nutriente pelos fertilizantes em kg/ha;

NP = número de plantas por hectare; Lb = largura do bulbo molhado;

P = profundidade efetiva do sistema radicular (0,3 m);

TAS = teor do nutriente na análise química do solo (mg/kg);

TR = taxa de recuperação do extrator do nutriente no solo (em fração);

Dessa forma, valores de BN negativos indicarão as quantidades necessárias de nutrientes a serem acrescentadas à fertirrigação, enquanto valores positivos de BN indicarão as quantidades de nutrientes a serem diminuídas da fertirrigação da cultura, considerando a produtividade esperada.

Os valores de TR para cada nutriente serão estabelecidos com base nos trabalhos de Possamai (2003), Oliveira *et al.* (2005), Santos *et al.* (2008) e Silva *et al.* 2009), fazendo-se os ajustes necessários

para o sistema de cultivo a ser empregado no presente projeto, ou seja, fertirrigação.

Uma das dificuldades do uso do FERTCAL® é que há ainda muitas lacunas a serem preenchidas, relacionadas principalmente com a capacidade de fornecimento de nutrientes pelo solo à cultura, a qual depende dos diversos fatores que controlam a disponibilidade de nutriente no solo (TAS e TR), bem com a eficiência de recuperação (ER) do nutriente pela planta. Portanto, cada cultura, cultivada em uma determinada região apresentará seus próprios valores de ER e SUPsolo.

No exemplo acima, considerando o suprimento de nutrientes apenas pelo solo, em função da análise de solo, teríamos que a quantidade total de N, P e K a serem aplicadas seriam de 155,0 kgN/ha; 102 kg P₂O₅/ha e 326 kg K₂O/ha. Comparando-se estas doses com as recomendadas pela análise de solo (item 4.1) verifica-se que as doses de N e K foram subestimadas e a de P superestimada, considerando que o método do Balanço nutricional é mais realista.

9

CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES

A instrução normativa N° 61, de 8 de julho de 2020 estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura.

Define-se como fertilizante toda substância mineral ou orgânica, natural ou sintética fornecedora de um ou mais nutrientes para as plantas. Os fertilizantes podem ser classificados de duas maneiras: pelo critério químico, em minerais (ou inorgânicos), orgânicos e organominerais, e pelo critério físico em sólidos, líquidos e gasosos. Será dada maior ênfase nas aulas práticas aos fertilizantes minerais sólidos.

9.1 Características químicas dos fertilizantes minerais

Os fertilizantes podem ser classificados quanto a sua natureza química em: fertilizantes minerais: (simples, compostos e mistos), orgânicos e organominerais.

- Fertilizante mineral: produto de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintético obtido por processo

físico, químico ou físico-químico, fornecedor de um ou mais nutrientes de plantas;

Exemplos:

Natural: Fluorapatita: $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{CaF}_2$ ou $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$

Sintético: $\text{CO}_2 + \text{NH}_3 \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (45%N)

Cloreto de potássio: KCl (60% K_2O)

Superfosfato Triplo: CaH_2PO_4 (42% P_2O_5)

- Fertilizante orgânico: produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais;

Exemplos:

Natural: Cama de frango, esterco de bovino, torta de mamona;

Compostagem: Mistura de produtos com relação C/N (baixa) com C/N (alta);

Esterco de galinha: (C/N baixa) + palha de milho (C/N alta);

Torta de filtro: (C/N média) + bagaço de cana (C/N alta).

- Fertilizante organomineral: produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos.

Exemplos:

Fosfato natural + Esterco de curral;

Gesso agrícola + Cama de frango.

Um fertilizante pode conter um, dois ou vários macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes. Uma vantagem óbvia de fertilizantes com vários nutrientes é a economia de trabalho na aplicação, mas deve-se considerar ainda que os nutrientes serão aplicados na mesma proporção.

a) Classificação quanto ao nutriente

Os fertilizantes podem ser classificados quanto ao nutriente contido em:

- Fosfatados;
- Nitrogenados;
- Cálcicos;
- Magnesianos;
- Sulfatados;
- Contendo micronutrientes.

As fontes minerais de fósforo são todas originadas de rochas fosfáticas, conhecidas como “fosfatos naturais”, que são encontrados na forma de compostos de ferro, alumínio e de cálcio. Os fosfatos de ferro e de alumínio têm sua solubilidade aumentada com a elevação do pH do solo. Os fosfatos de cálcio (apatitas e fosforitas), por sua vez, são mais solúveis em solos com pH ácido.

No comércio, são encontradas fontes naturais de fósforo e fontes industrializadas obtidas a partir de naturais.

a) Fosfatos naturais

Os fosfatos naturais de maior ocorrência são as apatitas. Esses fosfatos possuem um teor considerável de fósforo total (24 a 27% de P_2O_5 total), contudo, de baixa solubilidade. A solubilidade desses materiais é aumentada em meio ácido.

b) Superfosfato simples

Obtido por meio da mistura estequiométrica de H_2SO_4 com fosfatos naturais (apatitas). Possui, no mínimo, 18% de P_2O_5 solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) + água, 11% de S e 19% de Ca.

c) Superfosfato triplo ou concentrado

Obtido a partir da mistura estequiométrica de HPO_4 com fosfatos naturais (apatitas). Possui, no mínimo, 41 % de P_2O_5 solúvel em (CNA + água) e 13 % de Ca.

d) Escória de Thomas

É um subproduto da indústria do aço. Possui 17% de P_2O_5 total, 12% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico (AC) a 2 %, 25% de Ca e pequenas quantidades de Si, Mg, Fe e Mn.

e) Termofosfato

Obtido pela fusão a 1450 °C de fosfato natural (apatita ou fosforita) com uma rocha magnesianiana (serpentina). Contém, no mínimo, 17 % de P_2O_5 total, 16,5 % de P_2O_5 solúvel em AC a 2 %, 20 % de Ca e 9 % de Mg.

f) Fosfato monoamônico (MAP)

Obtido por meio da neutralização parcial de HPO_4 pela amônia. Possui, no mínimo, 48 % de P_2O_5 solúvel em CNA + água e 9% de N.

g) Fosfato diamônico (DAP)

Obtido por meio da neutralização parcial de H_3PO_4 pela amônia. Possui, no mínimo, 45% de P_2O_5 solúvel em CNA + água e 16% de N.

h) Fosfato parcialmente acidulado

Obtido pela reação do fosfato natural (apatita) com uma quantidade de ácido sulfúrico inferior à necessidade estequiométrica para a reação completa. Contém 20% de P_2O_5 total, 9% de P_2O_5 solúvel em CNA + água, 25% de Ca e 6% de S.

i) Farinha de ossos autoclavados

Possui 20% de P_2O_5 total, 16% de P_2O_5 solúvel em AC a 2%, 1,5% de N e 22% de Ca.

O nitrogênio é um dos nutrientes mais importantes para as plantas e, com frequência, o mais limitante à produção das culturas em geral, exceto as leguminosas. A fertilização nitrogenada é uma complementação à capacidade de suprimento de nitrogênio dos solos, a partir da mineralização de seus estoques de matéria orgânica, geralmente alta em relação às necessidades das plantas.

Os fertilizantes nitrogenados químicos são subdivididos em quatro grupos:

- a) Os amoniacais, que apresentam o nitrogênio na forma amoniacal, como a amônia anidra (82% N), as soluções amoniacais (20% N), o sulfato de amônio (21% N), o cloreto de amônio (25% N), o fosfato monoamônio (MAP) (9% N), o fosfato diamônio (DAP) (16% N), o fossulfato de amônio (13%N).
- b) Os nítricos, que apresentam o nitrogênio na forma nítrica, como o nitrato de sódio (16% N), o nitrato de potássio (13% N), o nitrato de cálcio (16% N), o nitrofosfato (14% N).
- c) Os nítrico-amoniacais, que apresentam o nitrogênio nas formas nítrica e amoniacal, como o nitrato de amônio (32% N), o nitrato de amônio e cálcio (20% N), o nitrosulfocálcio (25% N), o sulfonitrato de amônio (25% N), o sulfonitrato de amônio e magnésio (19% N).
- d) Os amídicos, que apresentam o nitrogênio na forma amídica, como a uréia (44% N), a ureia formaldeído (35 %N), a ureia revestida com enxofre (39% N) e a crotonilidina diurética (28% N).

O potássio constitui, juntamente com o nitrogênio e o fósforo, o grupo denominado de elementos nobres da fertilização. É de ocorrência generalizada na natureza, aparecendo sempre em formas combinadas inorgânicas ou, no solo, em forma iônica.

A fertilização potássica tem que garantir uma concentração de K na solução do solo suficientemente alta para satisfazer as necessidades da planta, nos períodos em que o elemento é mais exigido. Este objetivo poderá ser alcançado quando forem evitadas perdas por lavagem e fixação.

A eficiência dos fertilizantes potássicos depende sistematicamente da maneira de como são aplicados e das condições do solo a ser fertilizado. Diante disso, pode-se inferir algumas sugestões quanto ao uso do potássio do solo:

- a) solos naturalmente pobres em potássio requerem adições frequentes e moderadas.
- b) práticas culturais que melhoram as condições de aeração do solo (aração, gradagem, drenagem), bem como aquelas que evitam as perdas por lixiviação (adição de matéria orgânica e calagem) e por erosão (plantio em nível, terraço, etc.) tendem a promover um melhor aproveitamento do K no solo.
- c) A tendência para o equilíbrio entre o K não trocável, trocável e em solução e as perdas às quais o K solúvel está sujeito, sugerem dois princípios básicos para a adição de K como fertilizante: o primeiro, é que o elemento deve ser aplicado parceladamente em lugar de toda a quantidade necessária de uma só vez; o segundo, é que se deve concentrar o K no sulco ou na cova de plantio, sempre que possível.

Os fertilizantes potássicos mais utilizados são: cloreto de potássio (60% de K_2O), sulfato de potássio (50% de K_2O), sulfato

duplo de potássio e magnésio (22% de K_2O) e nitrato de potássio (44% de K_2O).

b) Forma química dos nutrientes

Dependendo do nutriente, eles podem se apresentar nos fertilizantes sob diferentes formas químicas. O potássio, por exemplo, é o caso mais simples, pois ele é encontrado apenas na forma iônica, K^+ , fornecida sobretudo através de KCl e mais raramente por K_2SO_4 , $KMg(SO_4)_2$ e KNO_3 . Como esses sais são solúveis em água, o comportamento no solo do potássio é praticamente invariável com relação à fonte empregada.

Já o nitrogênio pode ser aplicado ao solo em diferentes formas: amoniacal, NH_4^+ e NH_3 ; nítrica, NO_3^- ; amídica, NH_2 ; cianamídica, e proteica. Além do mais, essas formas, uma vez presentes no solo, sofrem transformações acentuadas em um espaço de tempo relativamente curto.

Com relação ao fósforo ele é aplicado basicamente como espécies protonadas do íon fosfato: $H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-} ou até mesmo H_3PO_4 . A concentração total dessas formas no solo vai depender estritamente da solubilidade da fonte empregada.

c) Concentração dos nutrientes

Os fertilizantes minerais apresentam uma vantagem bastante atraente do ponto de vista econômico, que é apresentarem elevadas concentrações de nutrientes, resultando em menores custos de armazenamento, transporte e aplicação por unidade de massa de nutriente. O emprego de fertilizantes mais concentrados pode trazer problemas com relação a macronutrientes secundários e micronutrientes. A concentração dos nutrientes no fertilizante mineral deve estar em acordo com o que foi especificado e garantido

pelo fabricante. Este pode se constituir em um ponto crítico na relação entre o agricultor, usuário de fertilizante, e o fornecedor do produto.

Na adubação de plantio de eucalipto são empregadas formulações mais concentradas em fósforo como 6-30-6 e 8-28-6, compostas em geral por fosfato diamônico, superfosfato triplo, ureia e KCl. Na adubação de cobertura são empregadas as misturas 20-0-20 e 20-5-20.

Uma lista completa de fertilizantes minerais mais utilizados no Brasil e no mundo e as respectivas concentrações de nutrientes pode ser acessada no anexo I da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 39, DE 8 DE AGOSTO DE 2018.

d) Compostos indesejáveis

Compostos tipicamente citados como nocivos às plantas e presentes nos fertilizantes são o biureto, formado na produção da ureia, os íons tiocianato e perclorato e a dicianodiamida. Recentemente, tem despertado interesse a ocorrência de metais pesados em fertilizantes e nesse sentido, a questão que mais tem causado polêmica é o uso de resíduos industriais como fonte de micronutrientes, como aqueles da indústria siderúrgica.

9.2 Características físicas dos fertilizantes minerais

Ao contrário das características químicas, as características físicas dos fertilizantes são mais difíceis de serem controladas pela legislação oficial e muitas vezes pendências podem ser resolvidas por acordo direto entre fornecedor e consumidor.

a) Estado físico

Fertilizantes são empregados predominantemente na forma sólida; soluções e suspensões ainda são relativamente restrito no Brasil. Os fertilizantes sólidos podem se apresentar sob os seguintes tipos:

- Misturas de grânulos: são os fertilizantes mistos ou misturas fertilizantes obtidas pela mistura física de dois ou mais fertilizantes granulados;
- Misturas granuladas: são os fertilizantes mistos ou misturas fertilizantes onde cada grânulo contém todos os nutrientes garantidos;
- Misturas complexas: são os fertilizantes mistos ou misturas resultantes de reação química entre matérias primas, como NH_3 , H_3PO_4 e H_2SO_4 , onde cada grânulo também contém todos os nutrientes garantidos.

b) Granulometria e misturas

A granulometria é característica física dos fertilizantes muito importante, uma vez que a facilidade do transporte, manuseio, acondicionamento e solubilidade depende muito da granulometria. Exemplo: geralmente fertilizantes na forma de grânulos são sais que não sofrem problemas de solubilidade no solo. Ao contrário disso, a fabricação de fertilizantes na forma de pó tem o intuito de facilitar a solubilidade do produto.

A granulometria de fertilizantes sólidos é determinada pelo tamanho e pela forma de suas partículas, sendo expressa quantitativamente por meio dos resultados de uma análise granulométrica. Esta análise consiste, basicamente, em fazer uma massa conhecida do produto passar por uma série de peneiras com tamanho de abertura de malha decrescente. Pesando-se a massa retida em

cada peneira, expressa-se cada fração em termos percentuais. A classificação granulométrica completa dos fertilizantes é estabelecida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) por meio da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 39, DE 8 DE AGOSTO DE 2018.

Como consequência da composição granulométrica, os fertilizantes sólidos podem apresentar o fenômeno da segregação. Segregação é a separação das partículas componentes de uma mistura de fertilizantes por ordem de tamanho. O fator que mais favorece esse processo é a desuniformidade de tamanho das partículas.

Os mais diferentes tipos de formulações NPK sob a forma de mistura de grânulos podem apresentar evidências de segregação, conforme ilustrado na Tabela 1.

A segregação dificulta particularmente a obtenção de amostras representativas ao influenciar a coleta de amostras, o processo de redução da quantidade amostrada e a medida de uma massa do fertilizante para análise. A segregação poderia ser minimizada se o controle de qualidade dos produtos que entram na composição das misturas fosse direcionado para que suas partículas apresentem uniformidade de tamanho. Contudo, como parte da matéria prima dos fertilizantes no Brasil é importada, esse controle torna-se muito difícil.

c) Consistência

Consistência significa o grau de dureza ou resistência a quebra (Tabela 26) ou abrasão do grânulo de fertilizante. Quando os grânulos são frágeis ocorre a quebra e ou a formação de pó, que resulta em partículas desuniformes.

Tabela 26. Índice de degradação de alguns fertilizantes pela abrasão durante o manuseio.

Fertilizantes	Porcentagem de degradação pela abrasão
Nitrato de amônio (perolado)	7,0
Sulfato de amônio (cristais)	2,5
Monoamônio fosfato (MAP)	0,8
Diamôniofosfato (DAP)	0,2
Superfosfato triplo	1,6
Superfosfato simples	13,0
Cloreto de potássio	3,8

Fonte: Novais *et al.* (2007).

d) Fluidez

É a capacidade de livre escoamento pelos sistemas mecânicos de aplicação e se relaciona com a eficiência de distribuição dos fertilizantes. A tendência de escoamento dos fertilizantes é avaliada pelo parâmetro ângulo de repouso; quanto menor este, maior a fluidez.

e) Densidade

É o parâmetro que relaciona massa e volume do produto. O conhecimento da densidade é importante no dimensionamento de áreas de armazenamento e de embalagens, bem como no transporte. Como exemplos de densidade podem ser citados os valores da ureia, $1,33 \text{ g cm}^{-3}$; fosfato diamônico, $1,78 \text{ g cm}^{-3}$ e KCl, $1,99 \text{ g cm}^{-3}$.

f) Solubilidade

Refere-se a capacidade de dissolução em água do fertilizante em g/100 mL de água (Tabela 27).

Quando se aplica um fertilizante ao solo pretende-se que ele consiga estabelecer uma concentração adequada de nutrientes na solução do solo. Já nas primeiras observações relacionadas à nutrição mineral de plantas constatou-se que os fertilizantes solúveis em água eram mais eficientes que fertilizantes orgânicos tradicionais como esterco, por exemplo. Mas há que se considerar o outro lado desta questão, ou seja, a perda de eficiência na adubação determinada pela lixiviação de nutrientes presentes em fontes solúveis.

Tabela 27. Solubilidade de alguns dos fertilizantes mais utilizados.

Fertilizante	Solubilidade (g/100 mL) a 20°C
Ácido fosfórico (sólido)	45,7
Ácido bórico	5,0
Cloreto de cálcio	60
Cloreto de potássio	34
DAP	40
MAP	22
Gesso (sulfato de cálcio)	0,24
Nitrato de amônio	190
Nitrato de potássio	31
Sulfato de amônio	73
Sulfato de potássio	11
Superfosfato simples	2
Superfosfato triplo	4
Sulfato de manganês	105
Sulfato de zinco	75
Sulfato de cobre	22
Ureia	100

Qualquer fertilizante que libere seus nutrientes no decorrer de um período relativamente longo pode ser considerado, em

princípio, como sendo de solubilidade controlada e, neste aspecto, os fertilizantes nitrogenados foram os mais estudados. O baixo custo dos fertilizantes potássicos desestimularam esforços de se aumentar sua eficiência e com relação aos adubos fosfatados a tendência é justamente a oposta, ou seja, pesquisas são dirigidas para obtenção de fontes mais solúveis.

9.3 Características físico-químicas dos fertilizantes minerais

a) Higroscopicidade

É a tendência que os materiais apresentam em absorver água do ar atmosférico. É expressa pelo parâmetro *umidade relativa crítica*, definida como a umidade relativa máxima a que o produto pode ser exposto sem absorver umidade. A mistura de dois fertilizantes apresenta maior higroscopicidade que a dos componentes envolvidos, o que dificulta a elaboração de misturas. Uma mistura de uréia e cloreto de potássio, por exemplo, apresenta umidade relativa crítica de 60,3%.

b) Empedramento

Empedramento é a cimentação das partículas de fertilizante para formar massas de dimensões muito maiores que as das partículas originais. A causa do empedramento é a formação de pontes de cristais entre as partículas de fertilizante, os quais atuam como pontos de ligação entre elas.

Também contribuem para o empedramento a consistência das partículas, a temperatura de estocagem e altura das pilhas. Em pilhas com mais de 20 sacas, considerada como uma altura moderada, a pressão de estocagem favorece o empedramento em fertilizantes que já apresentam essa tendência.

c) Índice salino

Índice salino é um parâmetro do fertilizante que informa sobre sua capacidade em aumentar a pressão osmótica da solução do solo (Tabela 28). As plantas, sobretudo as mais novas, sofrem problemas com o aumento de salinidade do solo, pois existe a tendência de a água caminhar para fora da célula do vegetal, causando murchamento.

Tabela 28. Índice salino de alguns dos fertilizantes minerais.

Fertilizantes	Índice salino
Nitrato de sódio	100
Nitrato de amônio	105
Sulfato de amônio	69
MAP	30
DAP	34
Nitrocálcio	61
Ureia	75
Amônia anidra	47
Superfosfato simples	8
Superfosfato triplo	10
Cloreto de potássio	116
Sulfato de potássio	46
Nitrato de Potássio	74
Sulfato de amônio	69

Fonte: Furtini Neto *et al.* (2001).

d) Índice de acidez

Corresponde à capacidade para acidificar ou alcalinizar o solo. Os fertilizantes nitrogenados são os que mais alteram a reação do solo (Tabela 29).

Tabela 29. Índice de acidez de alguns fertilizantes nitrogenados.

Fertilizante	Índice de acidez*
Amônia anidra	147
Sulfato de amônio	110
Nitrato de amônio	62
Ureia	71
MAP	58
DAP	75

* Quantidade de carbonato de cálcio em kg, necessária para neutralizar a acidez gerada por 100 kg do fertilizante.

9.4 Fertilizantes orgânicos

a) Importância

Fertilizantes orgânicos são todos aqueles produtos que, adicionados ao solo, têm como objetivo fundamental produzir húmus e contribuir, desta forma, para manter, ou elevar, o equilíbrio húmico dos solos cultivados. É possível que esses produtos contenham, também, outros elementos fertilizantes, porém, este aspecto deve ser considerado secundário.

A eficiência dos fertilizantes orgânicos para melhorar a produtividade do solo depende de alguns fatores que devem ser considerados: (a) qualidade e quantidade de aplicação; (b) épocas e condições de utilização; (c) métodos de aplicação; (d) adequabilidade aos sistemas agrícolas predominantes na região; (e) custo relativo de sua utilização. A matéria orgânica favorece o aumento da produção, ao melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

b) Fontes

- Resíduos Vegetais: Restos de culturas, resíduos de podas, serrapilheira, outros. Apresenta concentração de nutrientes muito variada. Geralmente palhadas com menos de 2% de N e C/N>30 promovem a imobilização inicial de N.
- Resíduos Animais: De 75 a 80% dos elementos minerais e 40% do C são eliminados pelas fezes e urina. O seu uso é fundamental pois evita a poluição.
- Resíduos Agroindustriais: Indústrias de sulcos, óleos vegetais, doces, álcool e farinha. Um litro de álcool produz 12 L de vinhaça.

Tabela 30. Faixas de teores de N, P₂O₅ e K₂O em alguns materiais orgânicos.

Fertilizantes	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	C/N
Casca de café	0,6-1,2	0,2-0,5	2,1 -3,8	50-120
Gramíneas	0,8-1,3	0,2-0,5	0,4-0,7	40-80
Palhada de milho	0,4-0,6	0,2-0,4	0,9 -1,7	60-120
Palhada de leguminosas	1,5- 5,0	0,3- 1,0	0,6-3,0	30-120
Bagaço de cana	0,8 -2,0	01-03	0,5-1,6	200-800
Serragem de madeira	0,05	0,02	0,03	15-30
Esterco bovino	0,3 -3,5	0,3-2,0	0,3-2,0	15-30
Esterco equino	0,3-2,0	0,4-2,5	0,3-2,0	10-20
Esterco ovino	0,3-4,0	0,6-2,1	0,3-3,0	10-20
Esterco de aves	0,3-5,0	0,2- 4,0	0,3-4,0	30-50
Esterco suíno	0,3-3,0	0,2-3,0	0,3-4,0	10-20
Tortas	0,8-2,0	0,5-2,0	0,3-1,0	30-50
Lixo urbano	0,3-1,3	0,2-1,5	0,2-1,5	-
Farinha de osso	1,0	18,0	-	-
Farinha de sangue	10,0	-	-	-

Fonte: Adaptado de Furtini Neto *et al.* (2001).

a) *Cálculo da dose de fertilizante orgânico sólido*

$$X = \frac{A}{B/100 \times C/100 \times D/100}$$

X = Quantidade do fertilizante a ser aplicado (kg/ha; g/planta)

A = Quantidade do nutriente aplicado (kg/ha; g/planta)

B = Teor de matéria seca do fertilizante (%)

C = Teor do nutriente na matéria seca (%)

D = índice de conversão (%) (Tabelado)

b) *Cálculo da dose do fertilizante líquido*

$$X = \frac{A}{C/100}$$

C/100

A = Quantidade do nutriente aplicado (kg/ha; g/planta)

C = concentração do nutriente no fertilizante em kg/m³

10

SOLOS COM EXCESSO DE SAIS E SÓDIO TROCÁVEL

10.1 Aspectos gerais

Os solos halomórficos são caracterizados por apresentarem concentrações elevadas de sais solúveis (salinidade), sódio trocável (sodicidade) ou ambos. Tais solos ocorrem em todo o mundo, particularmente em regiões áridas e semiáridas da terra, onde a precipitação pluviométrica é limitada. No Brasil os solos salinizados localizam-se na região Nordeste ou mais especificamente nos perímetros irrigados, encontrados nos polígonos das secas, que perfazem 57% da área total da região semiárida (Cordeiro *et al.* 1988; Ribeiro *et al.*, 2003). Nesta região as áreas afetadas por problema de salinidade somam quase 9,1 milhões de hectares (Pereira *et al.*, 1986; Ribeiro *et al.*, 2003).

Conforme o tipo de problema que afeta os solos, eles podem ser classificados em salinos, salino-sódicos e sódicos. Os solos salinos correspondem a solos com elevado teor de sais de Na, K, Ca, Mg que se acumulam no perfil do solo (Ribeiro *et al.*, 2003).

Nestes solos a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) é maior que 4 dS m^{-1} a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma percentagem de sódio trocável (PST) menor que 15, geralmente apresentam valores de pH menor que 8,5. Tais solos quase sempre são reconhecidos no campo pela presença de crostas brancas de sal em sua superfície. Em tais solos, o estabelecimento de um sistema de drenagem eficiente permite, através da lavagem, eliminar o excesso de sais na zona radicular das plantas (Richards, 1954). Uma classificação destes solos é apresentada na Tabela 31.

Tabela 31. Classificação dos solos com excesso de sais solúveis e sódio trocável.

Classificação	CEes (dS m^{-1})	pH	PST
Salino	$> 4,0$	$< 8,5$	< 15
Salino - sódico	$> 4,0$	$< 8,5$	> 15
Sódico	$< 4,0$	$> 8,5$	> 15

Fonte: Richards (1954).

Solos salino-sódicos são aqueles que apresentam elevados teores de sais solúveis associados a elevados teores de sódio trocável (Tabela 32) em comparação com os solos não-sódicos e não salinos (Tabela 32). Esses solos apresentam CEes maior que $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, PST superior a 15 e pH raramente maior que 8,5. Nestes solos a simples lavagem não é suficiente para sua recuperação. Sob tal condição, o excesso de sódio promove dispersão de argilas, que vão sendo iluviadas no perfil do solo, entupindo os poros, promovendo a formação de camadas adensadas ou impermeáveis. Em geral a recuperação requer o uso de corretivos químicos para a remoção do sódio trocável, melhorar a estruturação do solo antes de ser procedida a aplicação de uma lâmina de lixiviação (Santos & Muraoka, 1997).

Tabela 32. Atributos químicos de um solo salino-sódico em comparação com um solo não salino.

Solo	pH _{CaCl2}	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	PST	CEes
		----- cmol _c /dm ³ -----					dS/m
Salino-sódico	10,0	0,23	16,2	0,4	0,1	96	38,84
Não salino	6,1	0,38	0,09	2,0	0,4	2	0,83

Fonte: Sousa *et al.* (2012).

Os solos sódicos são aqueles cuja PST é maior que 15, com CEes menor que 4,0 dS m⁻¹ a 25 °C e valores de pH que variam entre 8,5 a 10. Nestes solos, a fração argila e a matéria orgânica em geral encontram-se dispersa, o que causa um escurecimento característico na superfície destes solos. A infiltração e a percolação da água nestes solos são extremamente afetadas, o que causa uma maior dificuldade na sua reabilitação/recuperação. Assim como nos solos salino-sódicos, o uso de corretivos químicos antes da aplicação de uma lâmina de lixiviação é fator crítico.

A salinidade proporciona alterações químicas e físicas no solo, as quais em última instância refletem no comportamento das espécies vegetais nos quais são cultivadas. A fertilidade do solo é grandemente afetada pelas condições de salinidade do solo. Os solos salinos apresentam elevados teores de ânions como cloreto, sulfato, carbonato, bicarbonatos e boratos na solução solo os quais podem causar distúrbios nutricionais às plantas (Santos & Muraoka, 1997).

Sob condições de sodicidade um agravante é o elevado pH (> 8,5), o qual origina toxidez de íons como o sódio e o cloro ou deficiências nutricionais, especialmente micronutrientes catiônicos como o zinco, cobre, manganês, cobalto e ferro (Rajj, 1991). Os íons Na⁺ em solos sódicos ou salino-sódicos promove o deslocamento dos cátions Mg²⁺, Ca²⁺ e K⁺ do complexo de troca substituindo-os e diminuindo sua disponibilidade para às plantas,

promovendo dispersão de argilas, uma vez que os cátions divalentes são substituídos por monovalentes aumentando a espessura da dupla camada difusa (Mcbride, 1995).

Além de influenciar nas propriedades químicas, as condições salinas, especificamente o excesso de Na, provoca alterações nas propriedades físicas do solo. O elevado poder dispersante do Na reduz a floculação e a estabilidade dos agregados do solo, reduzindo sua porosidade e a capacidade de retenção e infiltração de água no solo (Santos & Muraoka, 1997). O aumento da força iônica da solução do solo pelo excesso de sais também diminui a energia livre da água, dificultando sua absorção pelas plantas.

O alto pH, o excesso de sais e de sódio trocável, as propriedades físicas indesejáveis e a reduzida disponibilidade de nutrientes invariavelmente prejudicam o crescimento normal das culturas nesses solos, embora o efeito seja em diferentes intensidades conforme a tolerância das espécies vegetais. As principais alterações fisiológicas e distúrbios incluem redução na taxa de crescimento, fotossíntese, condutância estomática, transpiração e condutividade hidráulica das raízes, e injúria e abscisão foliar (Munns, 2002).

10.2 Recuperação de solos afetados pela salinidade

a) Uso de corretivos químicos

A minimização dos impactos ambientais e sociais proporcionados pelas áreas degradadas pelo excesso de sais em áreas irrigadas passa necessariamente pela adoção de técnicas de recuperação. O emprego de corretivos químicos (Tabela 33) como o gesso, o ácido sulfúrico e o enxofre elementar em solos salino-sódicos tem sido largamente difundido na literatura pertinente (Pitman & Laüchili, 2002; Qadir *et al.*, 2007). Quando empregado corretamente, tais corretivos têm se mostrado eficientes na melhoria das condições

químicas e físicas do solo, pela remoção do excesso de sódio trocável e estabelecimento de um pH mais apropriado para o adequado desenvolvimento das plantas e melhoria da estrutura do solo (Tanji, 1990; Suarez, 2001). Os efeitos dos corretivos químicos na recuperação de solos salinizados, entretanto, podem ser potencializados quando são empregadas espécies mais tolerantes às condições adversas de tais solos, em especial as espécies arbóreas (Qadir *et al.*, 2007).

Muitos trabalhos já foram conduzidos visando estabelecer estratégias de recuperação de tais solos de forma a reintegrá-los à exploração agrícola (Santos, 1995; Duran *et al.*, 2000; Vital, 2002; Nery *et al.*, 2007; Carneiro *et al.*, 2007; Holanda *et al.*, 2007; Menezes Jr, 2008; Severo *et al.*, 2019). OS resultados têm mostrado que o uso de corretivos neutros, como o gesso, ou de reação ácida, como o H_2SO_4 e o enxofre elementar podem se constituir em uma alternativa importante para recuperação desses solos, associados ao cultivo de espécies arbóreas tolerantes a ambientes salinos (Tertuliano & Santos, 1998; Amezketa *et al.*, 2005).

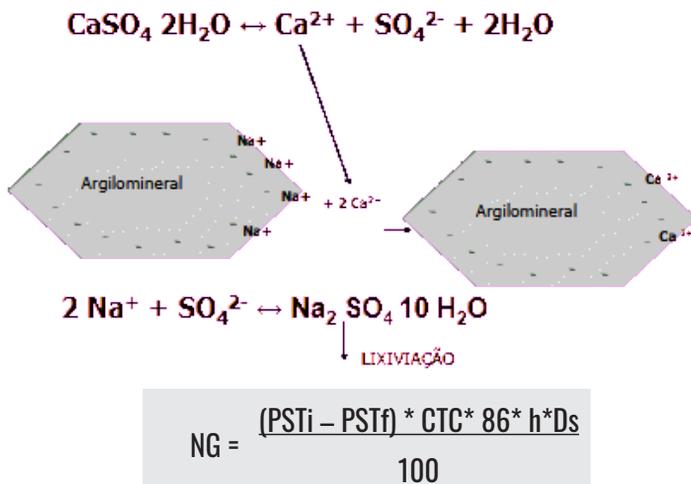
Tabela 33. Corretivos recomendados para recuperação de solos com excesso de sais solúveis e sódio trocável..

Corretivo	Composição química	Peso em kg equivalente a 1,0 kg de gesso
Gesso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	1,00
Enxofre	S°	0,19
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	0,57
Carbonato de cálcio	$CaCO_3$	0,58
Cloreto de cálcio	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0,85
Sulfato ferroso	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	1,61
Sulfato férrico	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	1,09
Sulfato de alumínio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	1,29
Pirita	FeS_2	0,63

Fonte: Santos & Moraoka (1997).

b) Uso de gesso

Dentre os corretivos químicos, o gesso tem sido o mais empregado, principalmente devido ao seu baixo custo em relação aos demais. O gesso agrícola é um subproduto da produção do ácido fosfórico, um insumo básico na produção dos diversos adubos fosfatados. O produto em comparação ao calcário, apresenta alta solubilidade e sua ação corretiva é relativamente rápida. Seus efeitos positivos na melhoria dos atributos químicos e físicos do solo têm sido verificados em diversos trabalhos (Santos, 1995, Haq *et al.*, 2001; Oad *et al.*, 2001; Barros *et al.*, 2004; Vital *et al.*, 2005; Leite *et al.*; 2007; Melo *et al.*, 2008; Leal *et al.*, 2008). O modo de ação do gesso é bem conhecido. Após sua solubilização, são liberados os íons Ca^{2+} e SO_4^{-2} para a solução do solo. O cátion Ca^{2+} liberado, desloca o sódio do complexo de troca para a solução do solo, enquanto o ânion SO_4^{-2} reage com o Na^+ formado o $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ o qual, juntamente com uma lâmina de água de percolação, é removido da zona radicular das plantas. Além disso, a substituição de um íon monovalente (sódio) por um íon divalente (cálcio), tende a aumentar a flocculação do solo e conseqüentemente sua estruturação. O gesso agrícola, embora tenha reação neutra, alguns trabalhos têm mostrado que o mesmo é capaz de reduzir o pH de solos salinos alcalinos (Gupta & Goi, 1992; Santos, 1995; Qadir *et al.*, 1996; Duran *et al.*, 2000; Gomes *et al.*, 2000; Vital *et al.*, 2005; Leite *et al.*, 2007). Tal fato é atribuído à remoção do perfil dos solos, íons com caráter básico como o Na^+ , CO_3^{-2} e OH^- após a aplicação da água de lixiviação (Qadir *et al.*, 1996).



NG = Necessidade de gesso (kg/ha)

PSTi = Percentagem de saturação por sódio inicial

PSTf = Percentagem de saturação por sódio final (desejada)

86 = Peso equivalente do gesso

h = profundidade de correção (cm)

Ds = Densidade do solo (g cm^{-3})

Exemplo.: PSTi = 60%; PST tolerável pela cultura = 15%;

DS = 1,0; h = 30 cm; CTC = 8,0 cmol/dm^3

NG = 9.288 kg/ha ou 9,3 t/ha de gesso

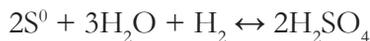
c) Uso de ácido sulfúrico

O ácido sulfúrico tem sido outro corretivo empregado em solos sódicos ou salino-sódicos. Tem como vantagem sua alta eficiência em reduzir o pH dos solos para níveis mais apropriados para o desenvolvimento das plantas (Tertuliano & Santos, 1998; Amezketa *et al.*, 2005) por proporcionar uma maior disponibilidade de nutrientes e maior atividade microbológica. Em solos alcalinos

e calcários, sua utilização se torna ainda mais importante devido o mesmo aumentar a solubilização do calcário e, ou, do gesso nativo do solo e aumentar a liberação de íons Ca^{2+} o qual irá contribuir para a neutralização do sódio do solo (Vital *et al.*, 2005). Como desvantagem, o ácido sulfúrico, é um corretivo de custo mais elevado que o gesso, além de necessitar de um maior cuidado no seu manuseio, devido ser um ácido extremamente forte com alto poder destrutivo quando concentrado. Dessa forma, o produto é aplicado na forma de soluções diluídas (Tertuliano & Santos, 1998).

d) Uso de Enxofre

O enxofre elementar tem sido igualmente relatado na literatura pertinente como um importante corretivo de solos salinizados, principalmente aqueles afetados por excesso de sódio (Stamford *et al.*, 2002; Qadir *et al.*; 2007). Seus efeitos são semelhantes aos proporcionados pelo ácido sulfúrico, uma vez que quando o produto é oxidado no solo por intermédio de bactérias *Thiobacillus thiooxidans* ocorre a produção do ácido sulfúrico cujo modo de ação no solo é idêntico ao ácido sulfúrico industrializado. A reação do enxofre elementar ocorre na da seguinte forma:



e) Uso de espécies vegetais

Além do uso de corretivos a utilização de espécies tolerantes à salinidade é uma das medidas eficientes na recuperação de solos degradados excesso de sais e sódio. A tolerância à salinidade de plantas é a capacidade de se desenvolverem e completarem seu ciclo de vida sobre um substrato que contém elevada concentração de sais solúveis (Flowers *et al.*, 1977; Greenway & Munns, 1980).

Contudo, esta tolerância se dá de diferentes formas e intensidades (Taiz & Zeiger, 2004). Plantas que podem tolerar estas elevadas quantidades de sais na rizosfera sem afetar seu crescimento são denominadas halófitas (Flowers *et al.* 1977; Taiz & Zeiger, 2004). Já plantas que não conseguem desenvolver-se sob condições de elevada salinidade são as glicófitas (Cheeseman, 1988; Munns, 2002). A vantagem das halófitas sobre as glicófitas advém da melhor atuação em novos mecanismos de tolerância, que proporcionam um manejo mais eficiente em acumular e compartimentar os solutos.

As plantas ampliaram seus mecanismos bioquímicos e moleculares para tolerar o estresse salino através de produtos e processos alternativos. Estes mecanismos atuam unidos (Ivengar & Reddy, 1996). As estratégias bioquímicas utilizadas incluem acumulação ou exclusão seletiva de íons, controle da entrada de íons pelas raízes e transporte para as folhas, compartimentalização de íons a nível celular (vacúolos) e estrutural (folhas), síntese de osmólitos, alterações nas vias fotossintéticas, modificações na estrutura de membrana, indução de enzimas antioxidantes e hormônios.

Neste contexto, o uso de espécies vegetais tolerantes às condições de solos salinos pode contribuir para que essas áreas sejam reintegradas mais rapidamente à produção agrícola. As espécies arbóreas são importantes para recuperação dessas áreas por possuírem sistema radicular profundo, aumentando a permeabilidade do solo, a lixiviação dos sais e o abaixamento do lençol freático. Além do mais, geralmente são espécies de uso múltiplo, fixam o nitrogênio atmosférico e concentram grande quantidade de matéria orgânica no solo.

11

SÍNTESE SOBRE MANEJO DE NUTRIENTES EM SOLOS TROPICAIS

O solo é um sistema bastante complexo constituído basicamente por quatro fases: fase sólida (minerais e matéria orgânica), fase líquida (água e solutos dissolvidos), fase gasosa (composta por diversos gases: CO₂, O₂, N₂ etc.) e a fase viva (organismos do solo). Estas fases apresentam uma interação entre si bastante forte e complexa que, juntamente com as influências externas, (manejo) são responsáveis pelo suprimento adequado ou não de nutrientes às plantas.

Solos de regiões tropicais apesar de na maioria dos casos apresentarem atributos físicos favoráveis ao cultivo agrícola, apresentam uma série de limitações químicas. Isso se deve ao fato de serem solos altamente intemperizados. Assim o manejo de nutrientes em tais solos é primordial para que sejam atingidas as produtividades desejadas.

O diagnóstico correto da fertilidade atual do solo é condição indispensável para o correto manejo de sua fertilidade. É ele quem vai guiar as práticas de adubação e calagem.

Solos tropicais em sua maioria apresentam necessidade de calagem devido à alta lixiviação de bases, material de origem rico em elementos de natureza ácida (principalmente alumínio) e por apresentarem altas concentrações de óxidos de ferro e alumínio como produtos finais do intemperismo, os quais apresentam forte interação com alguns elementos essenciais, principalmente o fósforo. Assim a calagem é a primeira prática a ser realizada antes de se pensar em adubar o solo.

Nutrientes como o fósforo, apresentam baixa disponibilidade em solos tropicais, pois grande parte deste elemento encontra-se fixado, pela adsorção e também pela precipitação com óxidos de ferro e de alumínio, ocorrendo com maior intensidade em solos com maior teor de argila e pH mais baixos (e por consequência maior teor de Al^{3+}). A prática da calagem por aumentar hidroxilas na solução do solo, promove precipitação destes óxidos aumentando o P disponível.

Em solos com baixa disponibilidade de fósforo, que é o caso em questão, a adubação fosfatada corretiva é uma prática recomendada. Ela visa saturar as *fontes* de fixação de fósforo no solo, para que se possa construir a fertilidade do solo neste nutriente, por tanto, não dispensa a adubação fosfatada propriamente dita. Nesta prática, o ideal é que seja utilizado uma fonte solúvel, aplicada a lanço (devido baixa mobilidade no solo), pois, como a calagem foi feita anteriormente, a aplicação de fosfatos naturais se constituirá em desperdício.

Ao contrário do fósforo, o potássio apresenta uma dinâmica bastante simples e por isso não é tão limitante em solos tropicais. Apesar disso, é um elemento que requer também atenção no seu manejo, pois, no processo de absorção é inibido competitivamente por Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ e por Fe^{2+} e Mn^{2+} em solos mal aerados ou com baixo potencial redox. Perdas deste elemento por lixiviação podem ocorrer quando se fazem adubações pesadas em solos

arenosos (principalmente se for em suco) e com baixa CTC – outra importância da calagem-como também da presença dos íons acompanhantes: NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , H_2PO_4^- . Outro cuidado que se deve ter na adubação potássica é a fonte a ser utilizada. O nitrato de potássio e cloreto de potássio apresentam alto índice salino, portanto deve-se observar a tolerância das espécies à salinidade quando do seu uso.

Assim como o K^+ , o Ca^{2+} e o Mg^{2+} também apresentam dinâmica simples no solo, sendo na maioria dos casos, fornecidos adequadamente na prática da calagem. No entanto tem se observado com frequência no campo deficiência de Ca^{2+} para algumas culturas como o tomate e a maçã, que são culturas mais exigentes neste nutriente. Isso ocorre porque o cálcio é imóvel na planta, e em condições mais úmidas, as folhas competem por cálcio com os frutos que transpiram menos e, portanto, apresentam a deficiência. Mg^{2+} , K^+ e NH_4^+ inibem competitivamente a absorção de Ca^{2+} , principalmente o NH_4^+ . Assim, a prática da adubação nitrogenada em culturas exigentes em Ca^{2+} com sulfato de amônio agrava ainda mais o problema (SO_4^{2-} poderá reagir com o Ca^{2+}), com também condições de baixa nitrificação (alta disponibilidade de amônio) - mais uma vez, ressalta-se a importância da calagem que favorece a atividade de microrganismos nitrificadores. A lixiviação de Ca^{2+} do ponto de vista de perdas, é de pouca importância, mas tem relevância para o enraizamento em profundidade. Isso pode ser obtido pela prática da gessagem devido a mobilidade do sulfato de cálcio no perfil do solo. No caso do Mg^{2+} a lixiviação é indesejável. Este elemento é inibido competitivamente no processo de absorção por Ca^{2+} , K^+ , NH_4^+ , e também compete pelos sítios de troca das argilas, ficando mais susceptível à lixiviação, principalmente em solos com baixa CTC, com manejo inadequado de irrigação (percolação), além da prática da gessagem feita inadequadamente. A relação Ca/Mg de 4/1 a 3/1

dita como adequada, mas, ultimamente não tem sido dada tanta importância a essa relação, pois tem sido observado que culturas como a soja toleram uma relação de até 20/1.

Dentre os elementos essenciais, o N é o mais exigido (com raras exceções) e o que apresenta uma dinâmica mais complexa, necessitando desta forma, um cuidado muito especial no seu manejo.

As plantas adquirem o N principalmente pela FBN e pela solução do solo (da mineralização da matéria orgânica ou via adubação). No solo as formas disponíveis de N se encontram na forma de NO_3^- ou NH_4^+ , sendo que as espécies diferem na preferência por uma forma ou outra. Assim, além da preferência da planta, tem que ser observada os fatores que influenciam nas transformações do N no solo quando da escolha do adubo. Por exemplo, a adubação com fontes nítricas em solos inundados ou com pH elevado (supercalagem) promove desnitrificação e, portanto, perda de N. Por outro lado, adubação com fontes amoniacais requer condições favoráveis a nitrificação (tais como: pH próximo a neutralidade, temperatura adequada e boa fertilidade do solo) tendo em vista que a presença de N apenas na forma de NH_4^+ é indesejável, devido à toxidez deste íon para a planta e sua interação com outros nutrientes presentes na solução do solo.

Quase todo o nitrogênio do solo encontra-se na forma orgânica. Assim os fatores que influenciam os teores de matéria orgânica no solo bem como sua mineralização, também afetam a disponibilidade de N no solo. Neste sentido, a qualidade da matéria orgânica no solo exerce importante papel na disponibilidade de N, já que imobilização (no caso materiais com alta relação C/N: maior que 30/1) e mineralização são processos concorrentes.

O enxofre assim como o nitrogênio apresenta uma dinâmica complexa no solo. Também como o N, a maior proporção de S no solo se encontra na matéria orgânica, e, portanto, sua

disponibilização para as plantas depende dos processos que envolvem a atividade microbiana nos processos (ex.: mineralização). Apesar de ser pouco exigido pelas plantas, hoje tem que se tomar cuidado o manejo deste nutriente. Tal fato é atribuído a utilização de fertilizantes cada vez mais pobres neste nutriente. Perdas de S podem ocorrer por lixiviação, devido a precipitação com Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ e no caso de supercalagem, a competição do sulfato com hidroxilas, aumenta o SO_4^{-2} da solução e conseqüentemente a lixiviação. Perdas também podem ocorrer em condições de anaerobiose devido à respiração do sulfato por microrganismos.

Em relação aos micronutrientes, atenção especial tem sido dada ao Boro e ao Zn, os quais têm apresentado problemas de deficiência no campo. Tal fato tem sido atribuído à adsorção em caso de supercalagem, lixiviação e aos baixos teores de matéria orgânica na maioria dos solos tropicais. No caso do Ferro e do Mn, é mais comum a ocorrência de toxicidade destes nutrientes. Contudo, no caso do Mn, assim como para o Zn, em caso de supercalagem pode ocorrer deficiência deste nutriente para as culturas mais exigentes. Tanto Zn como Cu formam complexos solúveis com compostos orgânicos provenientes da matéria orgânica aumentando sua disponibilidade, daí a importância do manejo da matéria orgânica na disponibilidade de micronutrientes.

No caso do cloro, a toxicidade no campo tem sido mais comum do que sua deficiência, pois o fornecimento de Cl como KCl, vai muito além da necessidade das culturas. O molibdênio por ser um dos micronutrientes menos exigido pelas plantas, também não tem sido observado grandes problemas. No entanto, as espécies fixadoras de nitrogênio como as leguminosas são particularmente exigentes em molibdênio, pois este nutriente é componente da nitrogenase, complexo enzimático envolvido na FBN.

Finalizando, deve-se ressaltar que no manejo dos nutrientes do solo, o conhecimento individual da dinâmica de cada nutriente

é desejável, mas, é de fundamental importância conhecer em profundidade as interações que ocorrem entre os mesmos dentro do sistema solo, tendo em vista que em condições reais, esta interação é inevitável. Pelos motivos já expostos anteriormente e pelas funções dos nutrientes dentro da planta, não se deve esquecer a Lei do Mínimo, pois a produção sempre será limitada por aquele nutriente que não está atendendo a necessidade da planta. Também a Lei dos incrementos decrescentes não deve ser esquecida, uma vez que os custos com adubos são bastante elevados, podendo ainda haver prejuízos por toxidez de determinados nutrientes como também prejuízos ao meio ambiente (poluição).

Estabelecer as condições necessárias para solos improdutivos se tornarem produtivos, é condição fundamental para sua conservação. É fundamental manter em quantidade e em qualidade os nutrientes do solo para que ele possa produzir alimentos e ao mesmo tempo manter o seu equilíbrio ecológico. Por outro lado, quanto mais se consegue produzir por unidade de área, menos áreas novas serão abertas, ou seja, menos desmatamento e menos áreas sujeitas aos processos erosivos.

A ideia que os solos jovens do semiárido são férteis, deve ser vista com muita cautela, pois grande parte destes solos apresentam sérias limitações em matéria orgânica e por consequência em nutrientes como nitrogênio e enxofre, assim como nos teores de potássio. Em relação ao fósforo, deve-se ressaltar a grande variabilidade de sua disponibilidade em solos do semiárido.

Finalmente, concluímos lembrando que a pesquisa em solos no semiárido ainda é incipiente e que há poucas informações passíveis de generalização. Contudo, os estudos existentes não devem ser menosprezados, devendo ser o ponto de partida para pesquisas mais aprofundadas e ampliadas, de forma que venham contribuir efetivamente com a conservação do solo desta frágil região.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ V. V. H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B. E LOPES, A.S. **Interpretação dos resultados das análises de solos.** In: RIBEIRO et al. (eds). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais.* Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa. p. 25-32, 1999.

AMEZKETA, E.; ARAGÜÉS, R.; GAZOL, R. **Efficiency of Sulfuric Acid, Mined Gypsum, and Two Gypsum By-Products in Soil Crusting Prevention and Sodic Soil Reclamation.** *Agronomy Journal*, 97:983–989, 2005.

ANDRADE, E.M.G. **Atributos químicos, físicos e morfológicos de solos em áreas degradadas pela exploração de madeira para lenha no semiárido da Paraíba.** Pombal, 2013. 45f. Monografia (Bacharelado em Agronomia). Universidade Federal de Campina Grande, Pombal (PB), 2013.

BARROS, M. F. C; FONTES, M. P. F; ALVAREZ, V. V. H.; RUIZ, H. A. **Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 8: 59-64, 2004.

BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO M. J. CAMARGO, F. A. O. **Fertilidade dos solos e manejo de adubação de culturas**. Porto Alegre: Metrópole Indústria Gráfica, p. 322, 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório: reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro: MA/CONTAP/USAID/SUDENE, p. 670, 1972. (Boletim Técnico, 15).

BRITO, M. T. L. A. **Avaliação espacial de atributos químicos do solo no semiárido**. Patos, PB:UFCG, 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

CANELLAS, L. P.; MENDONÇA, E. S.; DOBBSS, L. B.; BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. **Reações da matéria orgânica**. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, 2:7-18, 2008.

CARNEIRO, P. T.; BRITO, M. E. B; GOMES, A. H. S.; MEIRA, A. S.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R. **Tolerância do cajueiro anão precoce ao estresse salino na floração**. Workshop: Manejo e Controle da Salinidade na Agricultura Irrigada, 2007, Recife, Anais, 06 a 09 de novembro de 2007.

CARVALHO; F. T.; NOVAIS; R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI; R. B.; BAHIA FILHO, A. F. C. **Sistema de interpretação de análise de solo para recomendação de NPK para a cultura do milho**. Revista Ceres, 53:211-223, 2006.

CHEESEMAN, J. M. **Mechanism of salinity tolerance in plants.** Plant Physiology, 87:547–550, 1988.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO -CQFRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 400, 2004.

CORDEIRO, G. G.; BARRETO, A. N.; CARVAJAL, A. C. N. **Levantamento das condições de salinidade e sodicidade do Projeto de irrigação de São Gonçalo (2a parte).** Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, p. 54, 1988. (Documentos 54).

DURAN, R.; GARCIA, J.; AMAYA, R. **Amendment evaluation for the reclamation of sodic soils in the Cesar Valley.** Suelos Ecuatoriales, Quito, 30:21-28, 2000.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. p. 2012, 2006.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 2. ed. rev. Ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 627, 2009.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas.** 2ª ed. Londrina: Planta, 2006.

FAGERIA, N. K.; BALLGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. **Aluminum toxicity in crop plants.** Journal of Plant Nutrition, 11:303-319, 1988.

FIXEN, P.E. & LUDWICK, A.E. **Residual available phosphorus in near-neutral and alkaline soils: I. Solubility and capacity relationships.** Soil Science Society of American Journal, 46:332-334, 1982.

FLOWERS, T.J.; TROKE, P.F.; YEO, A.R. **The mechanism of salt tolerance in halophytes.** Annual Review of Plant Physiology, 28:89-12, 1977.

FRAGA, V. S.; SALCEDO, I. H. **Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming.** Soil Science Society of America. 68:215-224. 2004.

GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, M. F. A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. **Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:11283-1296, 2008.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. **Modificações nas formas de fósforo após a extração sucessiva com os métodos de Mehlich I e II e resina trocadora de ânions.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 29:363-371. 2005.

GOMES, E. M.; GHEYI, H. R.; SILVA, E. F. F. E. **Melhorias nas propriedades químicas de um solo salino-sódico e rendimento de arroz, sob diferentes tratamentos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 3:355-361, 2000.

GREENWAY, H.; MUNNS, R. **Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes.** Annual Review of Plant Physiology, 31:149-190, 1980.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. Eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008.

GUPTA, J. P.; GOI, A. T. R. **Effect of gypsum applications on physicochemical characteristics of sodic soil and crop yield of rice (*Oryza sativa*) and wheat (*Triticum aestivum*)**. Indian Journal of Agronomy, New Delhi, 37:812-814, 1992.

GUPTA, R. K.; ABROL, I. P. **Salt-affected soils: their reclamation and management for crop production**. Advances in Soil Science, New York, 11:224-88, 1990.

HAQ, I.; KHATTAK, S. G.; RAHMAN, H.; ALI, A.; SALIM, M. **Effect of Various Amendments on the Yield of Rice Crop under Saline-Sodic Conditions in Ardan/Swabi districts**. International Journal of Agriculture & Biology, 3:289-291, 2001.

HOEFT, R. G., WALSH, L. M., KEENEY, D. R. **Evaluation of various extractants for available soil sulfur**. Soil Sci. Soc. Am. Proc., v37:401-404, 1973.

Holanda, A. C.; SANTOS, R. V.; SOUTO, J. S.; ALVES, A. R. **Desenvolvimento inicial de espécies arbóreas em ambientes degradados por sais**. Revista de Biologia e Ciência da Terra. Recife, 7:39-50. 2007.

IYENGAR, E. R. R.; REDDY, M. P. **Photosynthesis in highly salt tolerant plants**. p. 897–909. In: M. Pesserkali (ed.). Handbook of photosynthesis. Marshal Dekar, Baten Rose, USA, p. 952, 1996.

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. S.; MONTENEGRO, A.A.A. FERREIRA, FL. **Fitorremediação de solo salino sódico por *atriplex nummularia* e gesso de jazida.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:1065-1072, 2008.

LETE, E. M.; CAVALCANTE, L. F. C.; DINIZ, A. A.; SANTOS, R. V.; ALVES, G. S.; LUCENA, CAVALCANTE, I. H. L. **Correção da sodicidade de dois solos irrigados em resposta à aplicação de gesso agrícola.** Irriga, 12:168-176, 2007.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Fertilidade do solo e produtividade agrícola.** In: NOVAIS, R.F. et al. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, p.1-64, 2007. p.1-64.

MALAVOLTA, E. - **ABC da Adubação.** Editora Agronômica. CERES Ltda. São Paulo (SP), p. 256, 1979.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** Piracicaba: POTAFOS, 1997.

McBRIDE, M.B. **Environmental Chemistry of Soils.** Oxford University Press, p. 416, 1995.

MELLO, F. A.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; COBRA NETO, A.; KIEHL, J. C. **Fertilidade do solo.** São Paulo: Nobel, p. 400, 1983.

MELO, R. M.; BARROS, M. F. C.; SANTOS, P. M.; ROLIM, M. M. **Correção de solos salino-sódicos pela aplicação de gesso**

mineral., Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 12:376–380, 2008.

MENEZES, R. I. Q; NUNES, L. A. P. L.; ARAÚJO FILHO, J. A.; SILVA, N. L. **Efeito da queimada e do pousio sobre a produtividade e as propriedades físicas e químicas de um solo sob Caatinga no semiárido nordestino.** In: Reunião Anual Da Sociedade Brasileira De Zootecnia, 42, 2005, Goiânia. CD-rom., Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2005.

MENEZES, R. S. C.; SALCEDO, I. H.; ELLIOTT, Edward T. **Microclimate and nutrient dynamics in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil.** Agroforestry Systems, Holanda, 56:27-38, 2002.

MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B; SALCEDO, I. H. (Org.). **Fertilidade do solo e produção de biomassa no semiárido.** Recife: UFPE, p. 291, 2008.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition.** Bern: International Potash Institute, p. 687, 1987.

MEURER, E. J. (Ed.) **Fundamentos de Química do Solo.** Evangraf. Porto Alegre. p. 285, 2006.

MOORE, P. A.; REDDY, K. R. **Role of e H and pH on phosphorus geochemistry in sediments of Lake Okeechobee.** Journal of Environmental Quality, 23:955–964, 1994.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo.** 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 1:729, 2006.

MUNNS, R. **Comparative physiology of salt and water stress.** Plant, Cell and Environment, Oxford, 25:239 – 250, 2002.

NERY, A. R.; SILVA, M. B. R.; RODRIGUES, L. N.; FERNANDES, P. D.; VIEGAS, R. A.; NETO, J. D.; FERNANDES, D. M. **Crescimento inicial do pinhão manso cultivado com água de diferentes níveis de salinidade.** Workshop: Manejo e Controle da Salinidade na Agricultura Irrigada, 2007, Recife, Anais..., 06 a 09 de novembro de 2007.

NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; ANJOS, J. L. **Efeito do alumínio em amostras de dois latossolos sob cerrado sobre o crescimento e absorção de nutrientes de mudas de *Eucalyptus spp.*** Revista Árvore, 6:17-28, 1982.

NOVAIS et al. editores. **Fertilidade do solo.** Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1017, 2007.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. 1999. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 399p.

NOVOTNY, E. H. **Estudos espectroscópicos e cromatográficos de substâncias húmicas de solos sob diferentes sistemas de preparo.** Tese (Doutorado em Ciências - Físico Química). Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

OAD, F. C.; OAD, D. L.; SOONRO, A.; SAMO, M. A.; OAD, N. L.; ABRO, Z. A. **Ameliorate effect of soil amendments and relevant fields practices in saline-sodic soil.** Pakistan Journal of Applied Sciences, 3:353-355, 2001.

OLIVEIRA, F. H. T. **Sistema para recomendação de calagem e adubação para a cultura da bananeira. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2002. 78p.** (Tese de Doutorado).

ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil.** Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. 369 p. (Planalsucar, 2).

PEREIRA, J. R.; VALDIVIESO, C. R.; CORDEIRO, G. G. **Recuperação de solos afetados por sódio através do uso do gesso.** In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1, 1985, *Anais...* Brasília, EMBRAPA/DDT, p.85-105, 1986.

PITMAN, M. G., LAÜCHLI, A. **Global impact of salinity and agricultural ecosystems.** In: Salinity: Environment–Plants–Molecules (A. Laüchli & U. Lüttge, Eds.), pp. 3–20. Kluwer Academic, Dordrecht, the Netherlands. 2002.

POSSAMAI, J. M. Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para o cultivo do algodoeiro. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, p. 91, 2003. (Dissertação de Mestrado).

QADIR, M.; OSTER, J. D.; SCHUBERT, S.; NOBLE, A. D.; SAHRAWAT, K. L. **Phytoremediation of Sodic and Saline-Sodic Soils.** *Advances in Agronomy*, 96:197-247, 2007.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação.** Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 343, 1991.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas : Instituto Agrônômico, 1996. 285p. (IAC. Boletim técnico, 100).

RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. A. **Solos Halomórficos do Brasil: Ocorrência, Gênese, Classificação, Uso e Manejo Sustentável**. In: CURTI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ, V. H. *Tópicos em Ciência do Solo*. Soc. Bras de Cic do Solo. v. 3, Viçosa, 2003.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: US Department of Agriculture, p. 160, 1954.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; SILVA, F. B. R. **Fertilidade dos solos do semiárido do Nordeste**. In: PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B. (eds.), *Fertilizantes: insumo básico para a agricultura e combate à fome*. CPATSA-EMBRAPA/SBCS, Petrolina, Brasil, p. 51-71, 1995.

SANTOS NETO, J. A. **Taxas de recuperação de zinco, cobre e boro por diferentes extratores em solos da Bahia e de Minas Gerais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, p. 51, 2003. (Dissertação de Mestrado).

SANTOS, F. C.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SEDIYAMA, C. S. **Modelagem da recomendação de fertilizantes para a cultura da soja**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:1661-1674, 2008.

SANTOS, R. V. **Correção de um solo salino sódico e absorção de nutrientes pelo feijoeiro vigna**. Piracicaba, 1995. 120 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição Mineral de Plantas), Universidade de São Paulo.

SANTOS, R. V.; MURAOKA, T. **Interação salinidade e fertilidade do solo** In: GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. (Ed.) Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada. Campina Grande: UFPB, p.289-317, 1997.

SEVERO, P. J. S.; ROCHA, J. L. A. R.; SANTOS, L. C.; SILVA, I. A.; SILVA, A. F. **Períodos de incubação de enxofre elementar em atributos químicos de um solo salinizado**. Brazilian Journal of Development, 5:15815-15827, 2019.

SILVA, A. P.; VÍCTOR, H. A.; SOUZA, A. P.; NEVES, J. C. L.; ROBERTO, R. F.; DANTAS, J. P. **Sistema de recomendação de fertilizantes e corretivos para a cultura do abacaxi - FERTCALC-abacaxi**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33:1269-1280, 2009.

SILVEIRA, M. M. L.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, E. V. S. B. **Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semiárido da Paraíba e de Pernambuco**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 30:1-13, 2006.

SOUZA JÚNIOR, R. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. **Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36:159-170. 2012.

STAMFORD, N. P.; FREITAS, A. D. S.; FERRAZ, D. S.; SANTOS, C. E. S. Effect of **sulphur inoculated with *Thiobacillus* on saline soils amendment and growth of cowpea and yam bean legumes**. Journal of Agricultural Science, 139:275–281, 2002.

STEINBERG, C. **Ecology of Humic Substances in Freshwaters**. Berlin: SpringerVerlag, p. 440, 2003.

STEVENSON, F. J. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. New York: John Wiley, p. 380, 1986.

SUAREZ, D. L. **Sodic soil reclamation: Modelling and field study**. Australian Journal Soil Research, 39:1225–1246, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia do Estresse** (Tradução 3 ed). In: TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. ED. Artmed, Califórnia, 2004.

TANJI, K. K. **Nature and extent of agricultural salinity**. In: Agricultural Salinity Assessment and Management, Manuals and Reports on Engineering Practices No. 71 (Tanji, K.K., Ed.), pp. 1–17. American Society of Civil Engineers, New York, 1990.

TERTULIANO, S. S. X.; SANTOS, R. V. **Crescimento de espécies arbóreas em solo salino-sódico tratado com ácido sulfúrico**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, 2:239-242, 1998.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizer**. 3a ed. New York, Collier Mc Millan International editions, p. 694, 1975.

VITAL, A. F. M.; SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F. C.; SOUTO, J. S. **Comportamento de atributos químicos de um solo salino-sódico tratado com gesso e fósforo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9:30-36, 2005.

VITAL, A.F.M. **Efeitos do gesso e do fósforo na disponibilidade de nutrientes e no desenvolvimento inicial do cajueiro em solo salino-sódico.** 2002. 93 p. (Dissertação-Mestrado em Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba. Areia.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Josinaldo Lopes Araújo Rocha: Professor associado da Universidade Federal de Campina Grande, onde leciona as disciplinas de Gênese do Solo, Fertilidade do Solo, Atributos Físicos e Químicos do Solo e Nutrição Mineral de Plantas. Possui graduação em Eng. Florestal (2003) pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), mestrado (2005) e doutorado (2008) em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Alexandre Paiva da Silva: Professor associado da Universidade Federal da Paraíba, onde leciona as disciplinas de Química e Fertilidade do Solo, Salinidade e Alcalinidade do Solo para graduação e Fertilidade do Solo e Adubação na pós-graduação. Possui graduação em Agronomia (1999) e, mestrado (2001) em Manejo de Solo e Água pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e doutorado (2006) em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Leônidas Canuto dos Santos: Foi professor do Instituto Federal de Minas Gerais, onde lecionou as disciplinas de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas. Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Campina Grande (2020/UFCG), atualmente é doutorando e mestre (2022) em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Pedro Jorge da Silva Severo: Engenheiro Agrônomo na Secretaria de do Desenvolvimento Agrário de Deputado Irapuan Pinheiro – CE. Possui graduação em Agronomia (2017) e mestrado em Horticultura Tropical pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Sobre o livro

Jefferson Ricardo Lima Araujo Nunes
Capa, Projeto Gráfico e Editoração

Garamond 12/14 e Oswald 11/14 pt
Tipologias Utilizadas

15x21cm
Formato

10,5x17 cm
Mancha Gráfica

Fundamentos de Fertilidade do Solo contempla conteúdos essenciais para o correto manejo da fertilidade dos solos tropicais ao mesmo tempo aborda as principais limitações de solos tipicamente do semiárido. As listas de exercícios apresentadas ao final dos capítulos, delimitam a abrangência e contribuem para a consolidação dos assuntos estudados. Uma ênfase é dada à prática da interpretação da análise de solo e recomendação de adubação.

ISBN 978-65-87171-70-8



 eduepb