

**Renato Lustosa Sobrinho
Bruno Rodrigues de Oliveira
Organizadores**



Fundamentos da Ciência de Solos Tropicais



Pantanal Editora

2026

Renato Lustosa Sobrinho
Bruno Rodrigues de Oliveira
Organizadores

Fundamentos da Ciência de Solos Tropicais



Pantanal Editora

2026

Copyright© Pantanal Editora

Editor Chefe: Dr. Alan Mario Zuffo

Editores Executivos: Dr. Jorge González Aguilera e Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diagramação: A editora. **Diagramação e Arte:** A editora. **Imagens de capa e contracapa:** Canva.com. **Revisão:** O(s) autor(es), organizador(es) e a editora.

Conselho Editorial

Grau acadêmico e Nome

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos
Profa. MSc. Adriana Flávia Neu
Profa. Dra. Albys Ferrer Dubois
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior
Profa. MSc. Aris Verdecia Peña
Profa. Arisleidis Chapman Verdecia
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu
Prof. Dr. Carlos Nick
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva
Profa. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos
Prof. MSc. David Chacon Alvarez
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira
Profa. Dra. Denise Silva Nogueira
Profa. Dra. Dennyura Oliveira Galvão
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves
Prof. Me. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Fábio Steiner
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto
Prof. MSc. João Camilo Sevilla
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira
Prof. Dr. Luciano Façanha Marques
Profa. Dra. Keyla Christina Almeida Portela
Prof. Dr. Leandro Argentel-Martínez
Profa. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla
Profa. MSc. Mary Jose Almeida Pereira
Profa. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes
Profa. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira
Profa. Dra. Patrícia Maurer
Profa. Dra. Queila Pahim da Silva
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)
Profa. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos
Prof. Dr. Tayronne de Almeida Rodrigues
Prof. Dr. Ugur Azizoglu
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira
Profa. Dra. Yilan Fung Boix
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Instituição

OAB/PB
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
UO (Cuba)
IF SUDESTE MG
Facultad de Medicina (Cuba)
ISCM (Cuba)
UFESSPA
UEA
UNEMAT
UFV
AJES
UFGD
UEMS
IFPA
UNICENTRO
IFMT
UFMG
URCA
ISEPAM-FAETEC
IFG
UEMS
UFF
(Colômbia)
UNAM (Peru)
IFRR
UCG (México)
Rede Municipal de Niterói (RJ)
UNMSM (Peru)
UFMT
SED Mato Grosso do Sul
UEMA
IFPR
Tec-NM (México)
Consultório em Santa Maria
UFJF
UEG
FAQ
UNAM (Peru)
SEDUC/PA
IFB
IFPA
UNIPAMPA
IFB
UO (Cuba)
UFMS
UFPI
UFG
UEMA
IFB
Sec. Mun. de Educação, Cultura e Tecnologia de Araripe
Universidade Kayseri, Türkiye
UFPI
FURG
UO (Cuba)
UFT

Conselho Técnico Científico
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior
- Esp. Maurício Amormino Júnior
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Ficha Catalográfica

Catalogação na publicação
Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

F981

Fundamentos da ciência de solos tropicais / Organização de Renato Lustosa Sobrinho, Bruno Rodrigues de Oliveira. – Nova Xavantina-MT: Pantanal, 2026.
94p. ; il.

Livro em PDF

ISBN 978-65-85756-90-7

DOI <https://doi.org/10.46420/9786585756907>

1. Ciência do solo. 2. Solos tropicais. I. Sobrinho, Renato Lustosa (Organização). II. Oliveira, Bruno Rodrigues de (Organização). III. Título.

CDD 631.4

Índice para catálogo sistemático

I. Ciência do solo



Nossos e-books são de acesso público e gratuito e seu download e compartilhamento são permitidos, mas solicitamos que sejam dados os devidos créditos à Pantanal Editora e também aos organizadores e autores. Entretanto, não é permitida a utilização dos e-books para fins comerciais, exceto com autorização expressa dos autores com a concordância da Pantanal Editora.

Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br

Apresentação

Este e-book foi concebido para nivelamento de estudantes de Pós-Graduação em Agronomia que não possuem formação em Agronomia, incluindo biólogos, engenheiros ambientais, químicos, zootecnistas, entre outros; e para auxiliar a comunidade atendida pelo Projeto de Extensão “Território Vivo” do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGAC) da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) da Unidade Universitária de Cassilândia.

Objetiva-se oferecer, por meio deste material, em linguagem acessível ao público amplo, os conceitos de Ciência do Solo que são indispensáveis para acompanhar as disciplinas do mestrado, compreender artigos científicos da área, dialogar com produtores e pesquisadores, entender relatórios e aplicar técnicas de manejo.

O texto parte dos fundamentos de Ciência do Solo e avança até temas aplicados, enfatizando aqueles primordiais para a agricultura tropical brasileira, como por exemplo: a Lei do Mínimo de Liebig, a calagem, a gessagem, a compactação do solo, o manejo diferenciado conforme o tipo e a textura do solo e a conservação do solo contra a erosão, com a comparação entre preparo convencional e plantio direto.

Ao final de cada capítulo há exercícios de fixação, cujo gabarito comentado se encontra no final deste e-book.

Dicas de utilização deste material

- Leia os capítulos na ordem: os conceitos dos capítulos 1 a 4 (fundamentos) são pré-requisitos para entender os capítulos 5 a 11 (aplicações). Os termos técnicos destacados em negrito estão reunidos no Glossário.
- Resolva os exercícios antes de consultar o gabarito.

Sumário

Apresentação	4
Capítulo 1	8
O que é o solo: formação, perfil e composição	8
Conceito de solo	8
Como o solo se forma: os fatores de formação	8
O perfil do solo e seus horizontes	10
As quatro frações: composição volumétrica do solo	11
Exercícios de fixação	13
Capítulo 2	14
Textura e estrutura: a física do solo	14
Textura: areia, silte e argila	14
Estrutura do solo	17
Densidade e porosidade	17
Água no solo	17
Exercícios de fixação	19
Capítulo 3	20
Química do solo: pH, CTC e matéria orgânica	20
pH: a acidez do solo	20
CTC: a despesa de cátions do solo	21
Matéria orgânica do solo (MOS)	24
Os nutrientes das plantas	24
Exercícios de fixação	25
Capítulo 4	26
A Lei do Mínimo de Liebig	26
O enunciado e o barril de Liebig	26
A leitura moderna: dos nutrientes a todos os fatores	27
Por que essa lei organiza todo o manejo do solo	28
Exercícios de fixação	29
Capítulo 5	30
Calagem: por que e como corrigir a acidez	30
Por que fazemos calagem	30
A química, em termos simples	30
Quanto aplicar: o cálculo da necessidade de calagem (NC)	32
Qualidade do calcário: PRNT, PN e RE	32
Como aplicar	33

Exercícios de fixação	34
Capítulo 6	35
Gessagem: melhorando o ambiente radicular em profundidade	35
O que é o gesso agrícola e o que ele NÃO faz	35
O problema que a gessagem resolve	35
Quando a gessagem é indicada	36
Quanto aplicar	36
Calagem × gessagem: o quadro comparativo	37
Exercícios de fixação	39
Capítulo 7	40
Compactação do solo	40
O que é e por que acontece	40
Consequências	40
Como diagnosticar	41
Prevenção e correção	42
Exercícios de fixação	44
Capítulo 8	45
Principais solos do Brasil e suas aptidões	45
O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)	45
As ordens mais importantes	45
Exercícios de fixação	49
Capítulo 9	50
Manejo conforme o tipo de solo: arenoso × argiloso	50
A lógica geral	50
Solo arenoso: “prepara assim”	50
Solo argiloso: “prepara assado”	52
Quadro-síntese	53
Exercícios de fixação	55
Capítulo 10	56
Erosão, proteção do solo e sistemas de preparo	56
Erosão: a perda “invisível” de fertilidade	56
Como a erosão começa: a gota de chuva	56
Práticas conservacionistas: as três frentes	58
Preparo convencional × plantio direto	60
Exercícios de fixação	64
Capítulo 11	65
Guia prático: interpretando a análise de solo e decidindo a correção	65
Antes do laudo: a amostragem é 90% do resultado	65

Lendo o laudo: o que é cada número	67
O roteiro de interpretação em 7 passos	68
Exemplo completo resolvido, passo a passo	70
Erros comuns de principiante (e como evitá-los)	71
Exercícios de fixação	72
Capítulo 12	73
Modelagem matemática	73
Lei de Mitscherlich e a dose econômica ótima	73
Exemplo de aplicação prática	74
Interpretação	74
Balanço de massas e taxas de exportação no sistema solo-planta	75
Exemplo de aplicação prática	76
Exercícios de fixação	78
Gabarito comentado	79
Capítulo 1	79
Capítulo 2	79
Capítulo 3	79
Capítulo 4	80
Capítulo 5	80
Capítulo 6	80
Capítulo 7	81
Capítulo 8	81
Capítulo 9	81
Capítulo 10	82
Capítulo 11	82
Capítulo 12	83
Glossário	85
Referências e leituras recomendadas	88
Índice Remissivo	89
Sobre os autores	90

Capítulo 1

O que é o solo: formação, perfil e composição

 10.46420/9786585756907cap1

Elen Cristina Fernandes Rosa 

Edson de Lima Bobadilha 

Vitor Augusto Neves 

CONCEITO DE SOLO

Para a Agronomia, o solo não é simplesmente “terra”. O solo é um **corpo natural, tridimensional e dinâmico**, formado por materiais minerais e orgânicos, água, ar e organismos vivos, que ocupa a superfície dos continentes e serve de meio para o crescimento das plantas. Ele é, ao mesmo tempo, suporte físico, reservatório de água e de nutrientes, habitat de bilhões de organismos e filtro ambiental.

Uma analogia útil: o solo funciona como a **“despensa e a caixa d’água” da planta**. A planta retira dele quase tudo de que precisa, exceto o carbono (que vem do CO₂ do ar) e a energia (que vem do sol). Por isso, boa parte da produtividade agrícola se decide no solo — e é por isso que um agrônomo passa tanto tempo falando de solo.

COMO O SOLO SE FORMA: OS FATORES DE FORMAÇÃO

O solo é o resultado da ação do **intemperismo** (conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que decompõem as rochas) ao longo do tempo. A pedologia resume a formação do solo em cinco fatores clássicos:

- **Material de origem:** a rocha ou o sedimento a partir do qual o solo se forma. Um basalto (rico em minerais ferromagnesianos) tende a gerar solos argilosos e férteis; um arenito tende a gerar solos arenosos e pobres.
- **Clima:** chuva e temperatura aceleram o intemperismo. Em clima tropical úmido, como no Brasil, o intemperismo é intenso: os solos são profundos, muito lixiviados (lavados) e, em geral, ácidos e pobres em nutrientes.
- **Organismos:** vegetação, fauna e microrganismos adicionam matéria orgânica e transformam o material do solo.
- **Relevo:** controla a drenagem e a erosão. Áreas planas acumulam solos profundos; encostas íngremes têm solos rasos.
- **Tempo:** solos jovens ainda se parecem com a rocha que os originou; solos velhos, como a maioria dos solos do Cerrado, já perderam quase tudo que era facilmente intemperizável.

Como um solo se forma

Os cinco fatores de formação do solo atuam ao longo do tempo por meio do intemperismo.

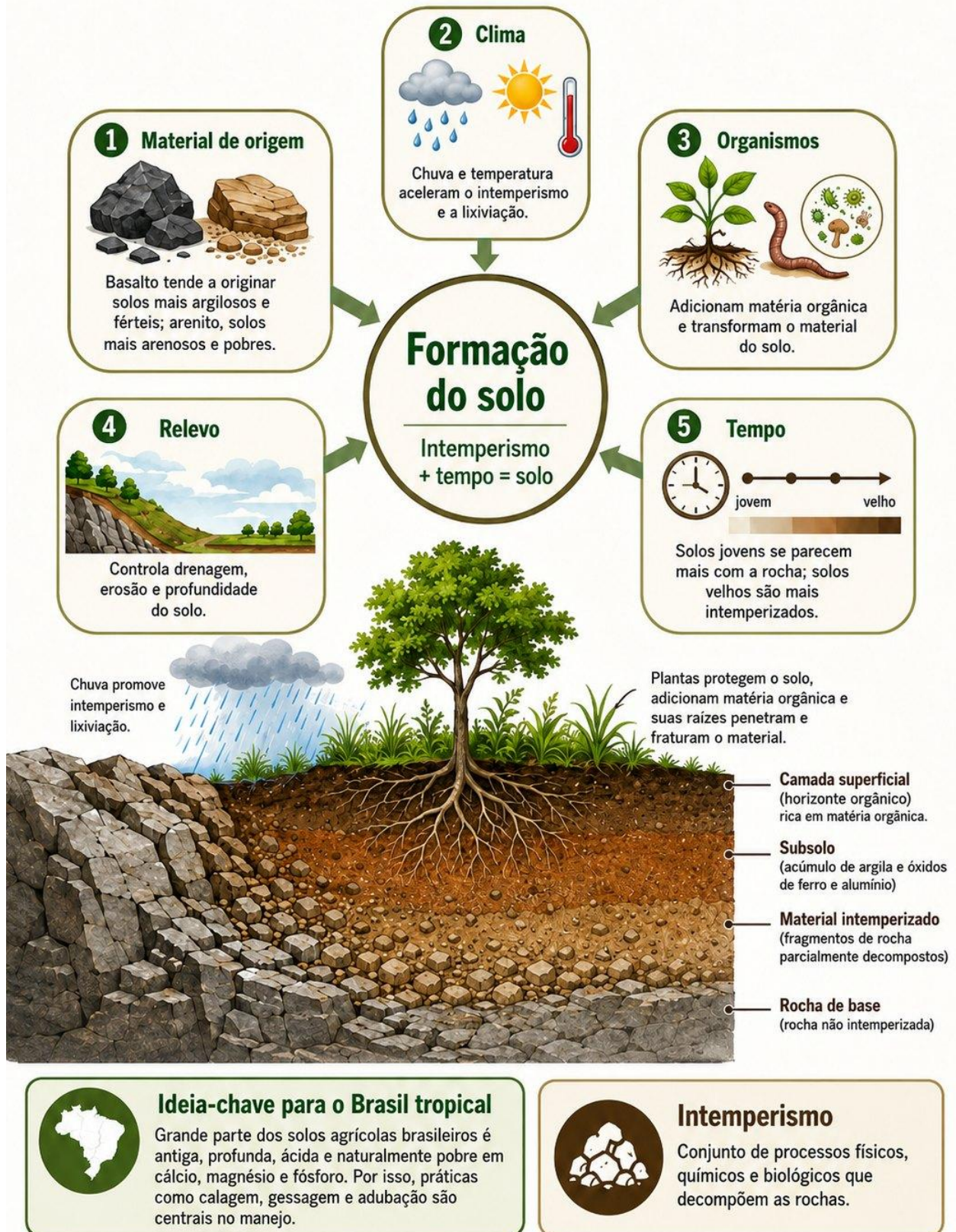


Figura 1. Os cinco fatores de formação do solo (infográfico didático da disciplina).

Ideia-chave para o Brasil tropical

A maior parte dos solos agrícolas brasileiros é **antiga, profunda, ácida e naturalmente pobre em cálcio, magnésio e fósforo**. Essa é a razão de práticas como calagem, gessagem e adubação fosfatada serem tão centrais na agricultura nacional — corrigimos quimicamente um solo que a natureza empobreceu ao longo de milhões de anos.

O PERFIL DO SOLO E SEUS HORIZONTES

Se cavarmos uma trincheira, veremos que o solo é organizado em camadas aproximadamente paralelas à superfície, chamadas **horizontes**. O conjunto de horizontes é o **perfil do solo**. Os principais são:

Horizonte	Descrição	Importância agrônômica
O	Camada orgânica superficial (serapilheira, resíduos em decomposição).	Proteção da superfície; comum em matas e em plantio direto (palhada).
A	Horizonte mineral superficial, escurecido pela matéria orgânica.	É a camada mais fértil e biologicamente ativa; concentra raízes e nutrientes. É onde se faz a amostragem de solo (0–20 cm).
B	Horizonte subsuperficial de máxima expressão dos processos de formação (acúmulo de argila, óxidos, cores vivas).	Define a classificação do solo (Latosolo, Argissolo etc.). Sua qualidade determina o aprofundamento das raízes.
C	Material pouco alterado, transição para a rocha.	Pouco explorado pelas raízes.
R	Rocha contínua.	Limite físico do solo.

O perfil do solo e seus horizontes

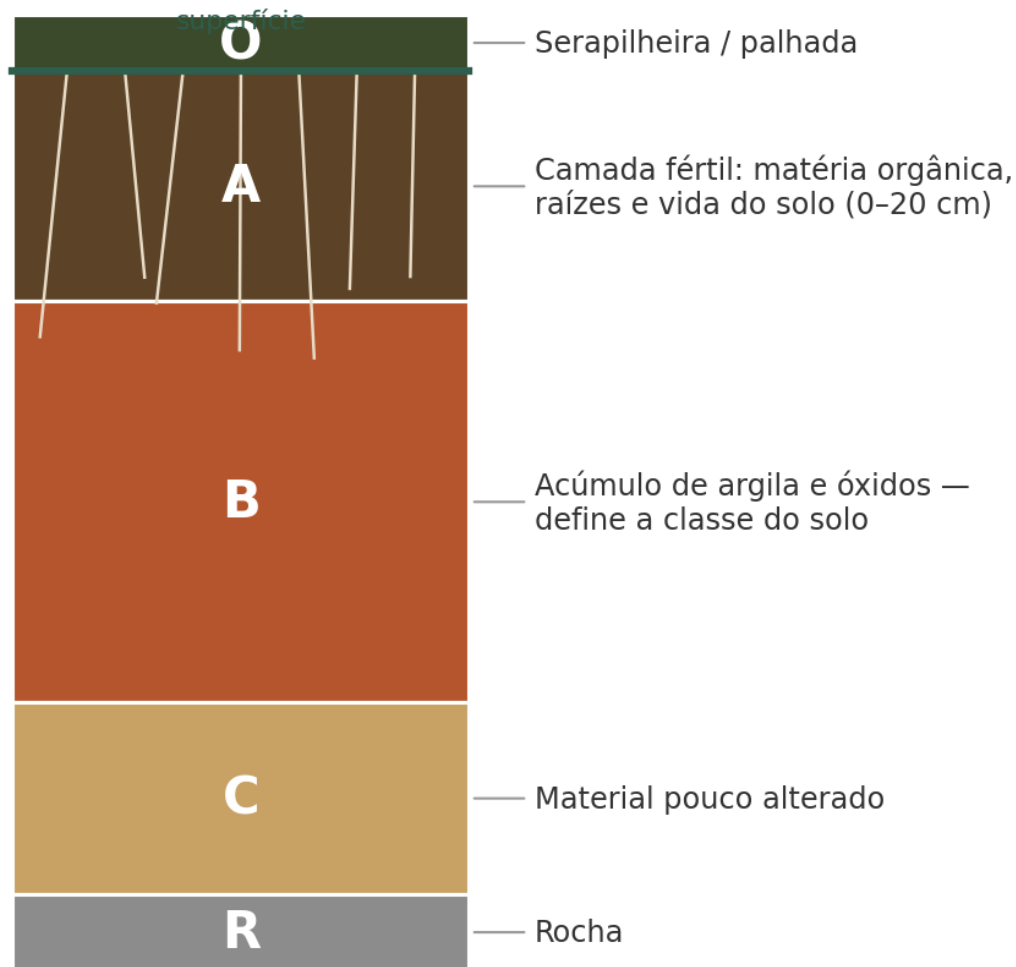


Figura 2. O perfil do solo e seus horizontes (ilustração esquemática, elaborada para esta apostila).

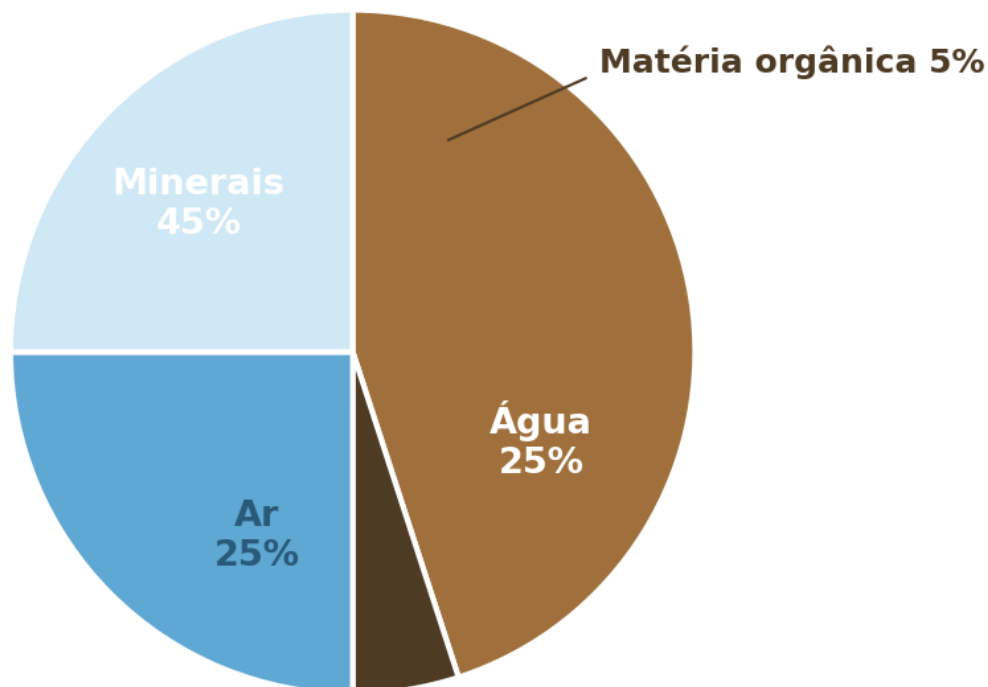
Na prática agrônômica, fala-se muito em **camadas de manejo**: 0–20 cm (camada arável, onde se concentram calagem e adubação) e 20–40 cm (subsuperfície, alvo da gessagem e onde se avaliam barreiras químicas e físicas ao enraizamento).

AS QUATRO FRAÇÕES: COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA DO SOLO

Em um solo em boas condições para as plantas, o volume se distribui aproximadamente assim:

- **45% de minerais:** partículas de areia, silte e argila, provenientes da rocha.
- **5% de matéria orgânica:** resíduos vegetais e animais em decomposição, húmus e organismos vivos (em solos tropicais cultivados esse valor costuma ficar entre 1 e 3%).
- **25% de água:** retida nos poros, formando a **solução do solo**, de onde as raízes absorvem os nutrientes.
- **25% de ar:** nos poros maiores; as raízes e os microrganismos respiram e precisam de oxigênio.

Composição volumétrica de um solo em boas condições



O espaço poroso (~50%) é dividido entre água e ar, em proporções que variam com a umidade.

Figura 3. Composição volumétrica aproximada de um solo em boas condições para as plantas.

Água e ar disputam o mesmo espaço: o **espaço poroso** (cerca de 50% do volume). Depois de uma chuva, os poros grandes drenam e se enchem de ar, e os pequenos retêm água. Esse equilíbrio é justamente o que a **compactação** destrói, como veremos no Capítulo 8.

Conceito essencial: a solução do solo

As raízes **não “comem” partículas de solo**: elas absorvem íons dissolvidos na água que envolve as partículas — a chamada solução do solo (ex.: NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}). Todo o manejo químico do solo (calagem, gessagem, adubação) consiste, no fundo, em controlar quais íons estão nessa solução, em que quantidade e em que profundidade.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Explique, com suas palavras, por que os solos de regiões tropicais úmidas como o Cerrado brasileiro tendem a ser ácidos e pobres em nutrientes, relacionando sua resposta aos fatores de formação do solo.
2. Diferencie horizonte A de horizonte B quanto à posição no perfil e à importância agronômica.
3. Um solo ideal tem cerca de 50% de espaço poroso. Explique o que ocupa esse espaço e por que o equilíbrio entre esses dois componentes é vital para as raízes.
4. Por que se diz que as plantas absorvem nutrientes da “solução do solo” e não do solo sólido? Que consequência prática isso tem para a adubação?

Capítulo 2

Textura e estrutura: a física do solo

 10.46420/9786585756907cap2

Elen Cristina Fernandes Rosa 

Renato Lustosa Sobrinho 

Bruno Ascoli 

Gustavo Haralampidou da Costa Vieira 

TEXTURA: AREIA, SILTE E ARGILA

A fração mineral do solo é classificada pelo **tamanho das partículas**:

Fração	Diâmetro (mm)	Características principais
Areia	2,0 – 0,05	Partículas grandes, visíveis, sem carga elétrica relevante. Criam poros grandes: muita aeração e drenagem, pouca retenção de água e nutrientes.
Silte	0,05 – 0,002	Intermediária; solos ricos em silte tendem a formar crostas e são muito erodíveis.
Argila	< 0,002	Partículas microscópicas em forma de lâminas, com grande superfície específica e cargas elétricas negativas . Retêm água e cátions (nutrientes).

A **textura** é a proporção entre essas três frações e é praticamente **imutável**: não se muda a textura de um solo com manejo. Ela é determinada em laboratório (análise granulométrica) e expressa, por exemplo, como “solo com 350 g/kg de argila” (= 35% de argila). Classes usuais de linguagem prática:

- **Solo arenoso** (textura arenosa): menos de ~15% de argila.
- **Solo de textura média**: cerca de 15 a 35% de argila.
- **Solo argiloso**: 35 a 60% de argila;
- **Muito argiloso**: acima de 60%.

Por que a argila é tão importante?

As partículas de argila (e a matéria orgânica) carregam **cargas negativas** que atraem e seguram cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e NH_4^+ , evitando que sejam lavados pela chuva. Essa capacidade de reter cátions é a **CTC** (Capítulo 3). Um solo arenoso, quase sem cargas, é como uma despensa com prateleiras estreitas: cabe pouco, e o que cabe escorre com facilidade.

Areia, silte e argila

O tamanho das partículas define a textura do solo e ajuda a explicar água, aeração e retenção de nutrientes.

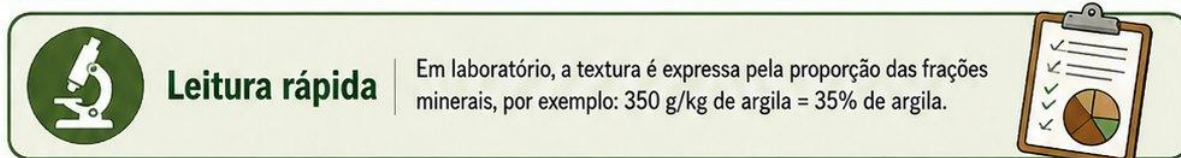


Figura 4. Areia, silte e argila: as três frações da textura do solo (infográfico didático da disciplina).

ESTRUTURA DO SOLO

Enquanto a textura é fixa, a **estrutura**, o modo como areia, silte e argila se unem formando **agregados**, é fortemente afetada pelo manejo. Uma boa estrutura, com agregados estáveis “cimentados” pela matéria orgânica, cria uma rede de poros de vários tamanhos: os **macroporos** (aeração e drenagem) e os **microporos** (retenção de água).

A matéria orgânica é o principal agente agregador dos solos tropicais. Práticas que a aumentam (plantio direto, plantas de cobertura, rotação de culturas) melhoram a estrutura; práticas que a destroem (gradagens excessivas, queima de resíduos, solo descoberto) degradam-na. A perda de estrutura leva a encrostamento superficial, menor infiltração de água, mais erosão e mais **compactação**.

DENSIDADE E POROSIDADE

Dois indicadores físicos aparecem o tempo todo em artigos e laudos:

- **Densidade do solo (Ds):** massa de solo seco por volume (g/cm^3 ou Mg/m^3). Quanto mais compactado o solo, maior a Ds. Valores típicos: solos argilosos bem estruturados, $1,0\text{--}1,3 \text{ g/cm}^3$; solos arenosos, $1,4\text{--}1,6 \text{ g/cm}^3$.
- **Porosidade total:** fração do volume ocupada por poros (ideal em torno de 50%). Mais importante que o total é a **distribuição**: a compactação destrói principalmente os macroporos.

ÁGUA NO SOLO

Três conceitos resumem a relação solo-água:

- **Capacidade de campo (CC):** quantidade de água que o solo retém depois que o excesso drenou (poros grandes com ar, pequenos com água). É o “solo úmido ideal”.
- **Ponto de murcha permanente (PMP):** teor de água abaixo do qual a planta não consegue mais extraí-la (a água restante está fortemente retida pelas partículas).
- **Água disponível (AD):** a diferença entre CC e PMP; é a água que a planta de fato consegue usar. Solos argilosos e ricos em matéria orgânica têm mais água disponível; solos arenosos, muito pouco — por isso sofrem mais com veranicos (períodos sem chuva dentro da estação chuvosa).

Água no solo

Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível explicam quanta água a planta realmente consegue usar.



Como ler essa ideia



Macroporos:
drenagem
e aeração



Microporos:
retenção
de água



**Matéria orgânica
e argila aumentam
a retenção de água**

Resumo prático



Solo arenoso



Armazena pouca água disponível; seca rápido e sofre mais com veranicos.



Solo argiloso



Armazena mais água disponível, mas exige boa estrutura e aeração.



Ideia-chave

Nem toda a água do solo está disponível. A planta usa principalmente a água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.



Em geral, solos argilosos e ricos em matéria orgânica armazenam mais água disponível que solos arenosos.

Figura 5. Água no solo: saturação, capacidade de campo, ponto de murcha e água disponível (infográfico didático da disciplina).

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Defina textura e estrutura do solo e explique qual das duas pode ser modificada pelo manejo.
2. Compare solos arenosos e argilosos quanto a: retenção de água, retenção de nutrientes, drenagem e aeração.
3. Um laudo indica “argila = 550 g/kg”. Classifique a textura desse solo e cite duas implicações práticas de manejo.
4. Explique o que é água disponível (AD) e por que um veranico de 15 dias prejudica muito mais uma lavoura em solo arenoso do que em solo argiloso.
5. Por que a matéria orgânica é considerada o principal agente de estruturação dos solos tropicais?

Capítulo 3

Química do solo: pH, CTC e matéria orgânica

 10.46420/9786585756907cap3

Edson de Lima Bobadilha 

Carlos Eduardo da Silva Oliveira 

Jorge González Aguilera 

Tiago Zoz 

PH: A ACIDEZ DO SOLO

O **pH** mede a atividade de íons H^+ na solução do solo, em escala de 0 a 14 (7 = neutro). A imensa maioria dos solos agrícolas brasileiros é **ácida**, com pH em água entre 4,0 e 5,5. As causas: chuvas abundantes que lixiviam os cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) ao longo de milênios, o próprio intemperismo tropical e, nos solos cultivados, o uso continuado de adubos nitrogenados amoniacais.

O pH importa por três razões principais:

- **Disponibilidade de nutrientes:** cada nutriente tem uma faixa de pH em que fica mais disponível. Na faixa de **pH 5,5 a 6,5** ocorre o melhor equilíbrio geral: fósforo mais aproveitável, micronutrientes ainda disponíveis.
- **Toxidez de alumínio (Al^{3+}):** abaixo de pH ~5,5, o alumínio dos minerais do solo se solubiliza como Al^{3+} , que é **tóxico às raízes**: engrossa, atrofia e “queima” as pontas das raízes, que param de crescer. É o problema químico número 1 dos solos tropicais.
- **Atividade biológica:** bactérias benéficas (como as fixadoras de nitrogênio da soja) trabalham mal em pH muito baixo.

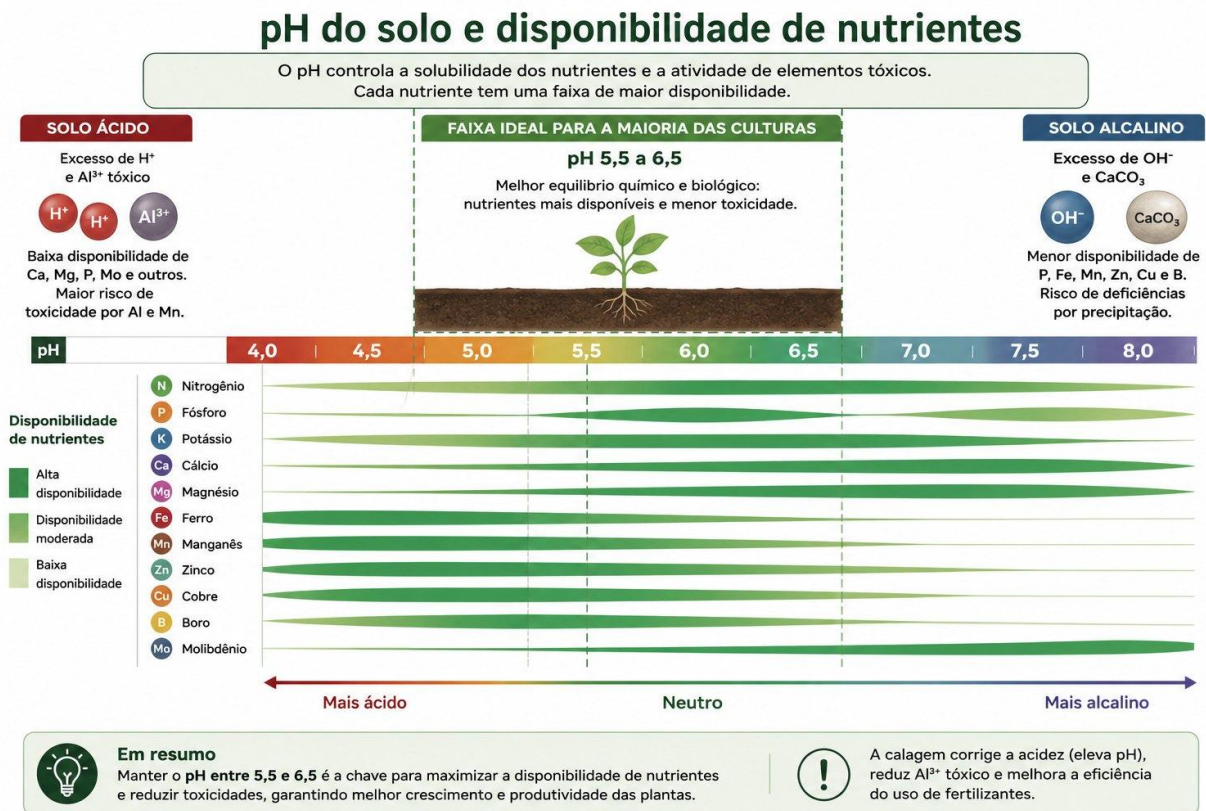


Figura 6. pH do solo e disponibilidade de nutrientes: a faixa 5,5–6,5 oferece o melhor equilíbrio (infográfico didático da disciplina).

CTC: A DESPENSA DE CÁTIÖNS DO SOLO

A **Capacidade de Troca de Cátions (CTC)** é a quantidade total de cargas negativas do solo capazes de reter cátions de forma **trocável** — isto é, os cátions ficam adsorvidos (grudados eletricamente) às argilas e à matéria orgânica, mas podem ser trocados com a solução do solo e absorvidos pelas raízes. É expressa em **cmolc/dm³** (centimol de carga por decímetro cúbico de solo).

Os cátions trocáveis relevantes se dividem em dois grupos:

- **Bases trocáveis:** Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ (e Na^+). A soma delas é a **Soma de Bases (SB)**.
- **Cátions ácidos:** H^+ e Al^{3+} (a chamada **acidez potencial, H+Al**).

A **CTC a pH 7 (T)** é a soma de tudo: **T = SB + (H+Al)**. Dela derivam dois índices que você verá em todo laudo de análise de solo:

Dois índices que resumem a fertilidade

V% (saturação por bases) = $(SB \div T) \times 100$ — indica que porcentagem da “despesa” (CTC) está ocupada por nutrientes (bases). Solos férteis (eutróficos): $V \geq 50\%$. Solos pobres (distróficos): $V < 50\%$. É o número-chave do cálculo de calagem.

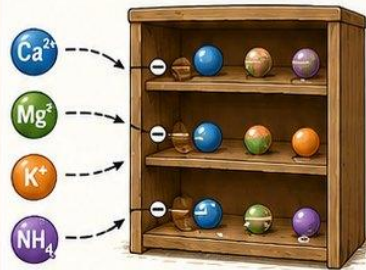
m% (saturação por alumínio) = $[Al \div (SB + Al)] \times 100$ — indica quanto do complexo de troca efetivo está ocupado pelo alumínio tóxico. Valores acima de $\sim 20\%$ já prejudicam culturas sensíveis; solos álicos ($m > 50\%$) são severamente limitantes.

Exemplo numérico: um solo com $\text{Ca} = 1,5$; $\text{Mg} = 0,5$; $\text{K} = 0,2$; $\text{H+Al} = 5,8$ (tudo em cmolc/dm^3) tem $\text{SB} = 2,2$; $\text{T} = 8,0$; **$\text{V}\% = 27,5\%$** , um solo distrófico, típico de Cerrado, que certamente precisará de calagem.

CTC: a despesa do solo

A capacidade de troca de cátions mostra quanto o solo consegue reter e disponibilizar nutrientes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e NH_4^+ .

1 O que é CTC?

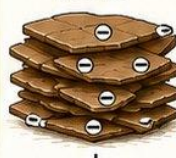


É a capacidade do solo de reter cátions nutrientes e liberá-los para a solução do solo.

Maior CTC = maior reserva de nutrientes

2 De onde ela vem?

ARGILA



MATÉRIA ORGÂNICA

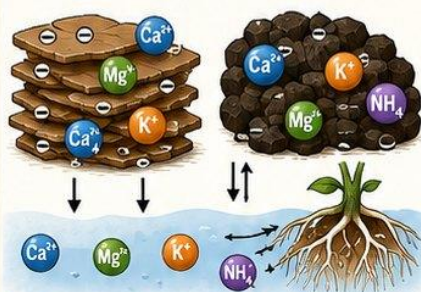


CARGAS NEGATIVAS

As cargas da argila e da matéria orgânica atraem e seguram cátions.

Nos solos tropicais, a matéria orgânica é uma fonte muito importante de CTC.

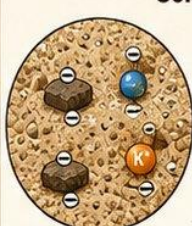
3 Como funciona?



Os cátions ficam adsorvidos nas cargas negativas e podem trocar de lugar com os íons da solução do solo.

A planta absorve nutrientes da solução do solo.

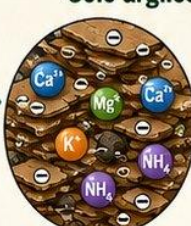
Solo arenoso



Baixa CTC

- Pouca reserva de nutrientes
- Maior risco de lixiviação

Solo argiloso / com boa matéria orgânica



Maior CTC

- Maior reserva de nutrientes
- Mais estabilidade química

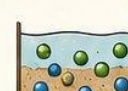
Como interpretar

CTC baixa



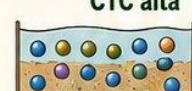
→ Típico de solos arenosos.

CTC média



→ Capacidade intermediária.

CTC alta



Maior retenção de nutrientes e geralmente maior necessidade de calcário para mover o V%.

Resumo prático

Argila ↑



aumenta a CTC.

Matéria orgânica ↑



aumenta a CTC e a retenção de água.

Lixiviação



é maior quando a CTC é baixa.

Adubação



em solos de baixa CTC, parcelar N e K ajuda a reduzir perdas.



Ideia-chave

A CTC funciona como a despesa do solo: quanto mais cargas da argila e da matéria orgânica, maior a capacidade de armazenar nutrientes para a planta.

Exemplo mental: solo arenoso = despesa pequena; solo argiloso e rico em matéria orgânica = despesa maior.

Figura 7. CTC, a “despesa” do solo: origem das cargas e consequências práticas (infográfico didático da disciplina).

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS)

A matéria orgânica é o componente mais multifuncional do solo. Mesmo representando poucos por cento da massa, ela:

- Responde por **grande parte da CTC** dos solos tropicais (nos arenosos, é praticamente a única fonte de cargas);
- É o principal **agente de agregação** e estruturação;
- Armazena e libera gradualmente **N, P e S** pela mineralização feita pelos microrganismos;
- Aumenta a **retenção de água**;
- Alimenta a **vida do solo** (microrganismos, minhocas etc.) e complexa o alumínio tóxico.

Em clima tropical, a decomposição é rápida: manter e elevar a MOS exige aporte contínuo de resíduos (palhada, raízes, plantas de cobertura) e mínimo revolvimento do solo — os pilares do **plantio direto**.

OS NUTRIENTES DAS PLANTAS

As plantas exigem 17 elementos essenciais. Excluindo C, H e O (obtidos do ar e da água), os demais vêm do solo e se dividem pela quantidade exigida:

Grupo	Nutrientes	Papéis principais (resumo)
Macronutrientes primários	N, P, K	N: crescimento e proteínas (folhas amareladas quando falta). P: energia (ATP), raízes e arranque inicial; muito limitante em solos tropicais, pois é “fixado” pelos óxidos de ferro e alumínio. K: regulação hídrica e qualidade dos frutos/grãos.
Macronutrientes secundários	Ca, Mg, S	Ca: paredes celulares e crescimento das pontas de raiz (não transloca na planta!). Mg: átomo central da clorofila. S: proteínas e enzimas. Ca e Mg são fornecidos pela calagem; Ca e S, pela gessagem.
Micronutrientes	B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn	Exigidos em gramas por hectare, mas igualmente essenciais. Atenção: a disponibilidade da maioria (Fe, Mn, Zn, Cu) CAI quando o pH sobe — calagem em excesso pode induzir deficiências.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Calcule SB, T e V% de um solo com $\text{Ca} = 2,0$; $\text{Mg} = 0,8$; $\text{K} = 0,3$; $\text{H} + \text{Al} = 4,9 \text{ cmolc/dm}^3$. Esse solo é eutrófico ou distrófico?
2. Explique por que o alumínio (Al^{3+}) é considerado o principal problema químico dos solos tropicais e descreva seu efeito sobre as raízes.
3. Por que a matéria orgânica é proporcionalmente muito mais importante para a CTC de um solo arenoso do que de um solo argiloso?
4. Um solo tem $\text{m}\% = 45\%$. O que esse valor significa e que prática corretiva você recomendaria?
5. Cite duas razões pelas quais a faixa de pH 5,5–6,5 é considerada ideal para a maioria das culturas.

Capítulo 4

A Lei do Mínimo de Liebig

 10.46420/9786585756907cap4

Vitor Augusto Neves 
Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho 
Eduardo Paulino da Costa Silva 
Edilson Costa 

O ENUNCIADO E O BARRIL DE LIEBIG

Formulada no século XIX a partir dos trabalhos de Carl Sprengel e popularizada pelo químico alemão **Justus von Liebig** (1803–1873), a **Lei do Mínimo** afirma que:

Lei do Mínimo

O crescimento e a produtividade de uma planta não são limitados pela quantidade total de recursos disponíveis, mas pelo **recurso que estiver em menor disponibilidade relativa às necessidades da planta** — o fator limitante ou “fator no mínimo”.

A imagem clássica é o **barril de Liebig**: um barril feito de tábuas (aduelas) de alturas diferentes, em que cada tábua representa um nutriente ou fator de produção (N, P, K, Ca, água, luz...). Não importa quão altas sejam as demais tábuas: **a água só enche até a altura da tábua mais curta**. Do mesmo modo, a produtividade “vaza” pelo nutriente mais deficiente.

O barril de Liebig: a produtividade "vaza" pelo fator mais escasso

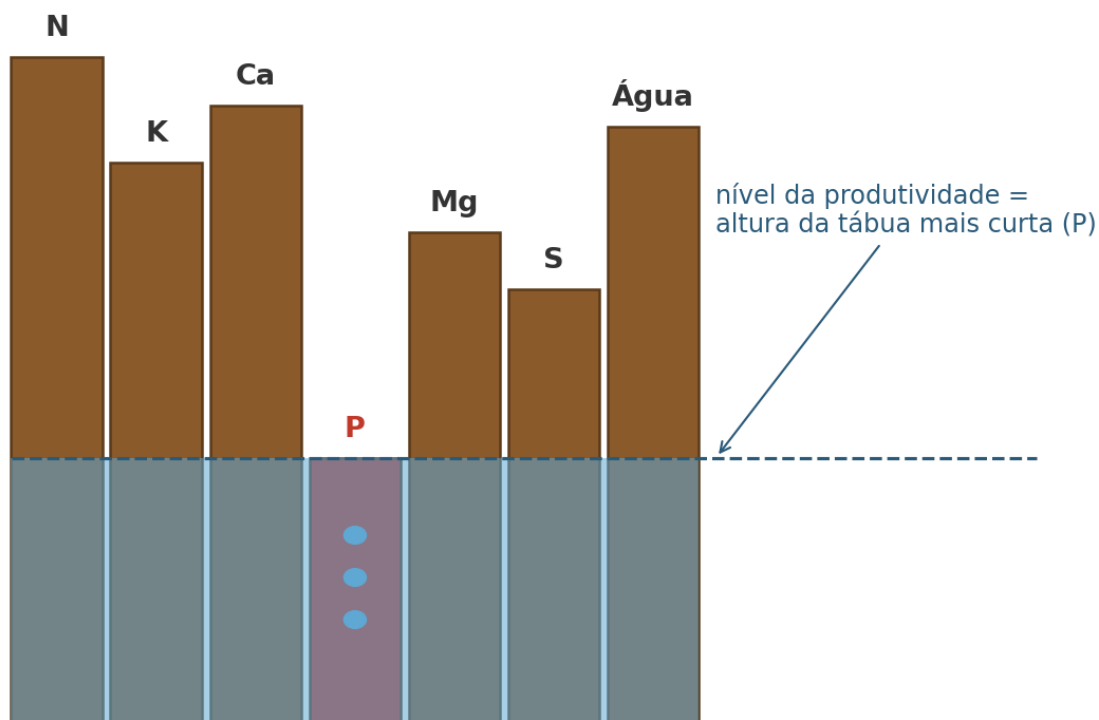


Figura 8. O barril de Liebig: as tábuas são os fatores de produção; a água (produtividade) só sobe até a tábua mais curta.

Consequência prática imediata: **não adianta adicionar mais daquilo que já é suficiente.** Se o fator limitante de uma lavoura é o fósforo, dobrar a dose de nitrogênio não aumentará a produtividade em nada, apenas o custo (e possivelmente a poluição). Primeiro identifica-se a tábua mais curta (via análise de solo e de folhas), depois corrige-se **exatamente ela**.

A LEITURA MODERNA: DOS NUTRIENTES A TODOS OS FATORES

A agronomia moderna ampliou a Lei do Mínimo em três direções importantes:

- **O fator limitante não precisa ser um nutriente.** Pode ser água, oxigênio nas raízes, luz, temperatura — ou uma **camada compactada** que impede as raízes de alcançar água e nutrientes que “estão lá”. Um solo perfeitamente adubado com subsolo compactado continua produzindo pouco: a tábua curta é física, não química.
- **Lei dos rendimentos decrescentes (Mitscherlich).** Ao corrigir o fator limitante, a resposta da planta é grande no início e vai diminuindo à medida que se aproxima da suficiência — cada quilo adicional de adubo rende menos que o anterior. Por isso existem doses econômicas ótimas, e não “quanto mais, melhor”.
- **Interações entre fatores.** Os fatores não são totalmente independentes: corrigir um, melhora o aproveitamento dos outros (ex.: corrigir a acidez aumenta a eficiência da adubação fosfatada; boa nutrição potássica melhora o uso da água). A visão de sistema supera a correção isolada de cada tábua.

POR QUE ESSA LEI ORGANIZA TODO O MANEJO DO SOLO

A Lei do Mínimo é o fio condutor desta apostila. Em solos tropicais recém-incorporados à agricultura, as tábuas mais curtas quase sempre são, nesta ordem: **acidez/alumínio tóxico** (corrigida pela calagem — Capítulo 5), **cálcio e alumínio na subsuperfície** (corrigidos pela gessagem — Capítulo 6), **fósforo** (corrigido pela adubação corretiva) e, em áreas já cultivadas com manejo inadequado, **limitações físicas como a compactação** (Capítulo 8). O diagnóstico correto do fator limitante — e não a aplicação de “receitas” — é o que caracteriza o manejo racional.

Exemplo integrador

Uma lavoura de soja em Latossolo argiloso produz 45 sc/ha enquanto vizinhos colhem 65 sc/ha. A análise química de 0–20 cm está adequada ($V = 60\%$). A investigação em trincheira revela camada compactada de 12–25 cm e raízes concentradas nos primeiros 10 cm. O fator no mínimo não era nutriente algum: era oxigênio/resistência física à raiz. Qualquer real gasto em mais adubo seria desperdiçado — a solução passa por descompactação e manejo da estrutura.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Enuncie a Lei do Mínimo de Liebig e explique a analogia do barril.
2. Uma lavoura tem K muito baixo e todos os demais fatores adequados. O produtor decide aplicar o dobro de N “para compensar”. Critique essa decisão com base na Lei do Mínimo.
3. Dê um exemplo em que o fator limitante da produtividade não é um nutriente e explique como ele seria diagnosticado.
4. O que a lei de Mitscherlich (rendimentos decrescentes) acrescenta à Lei do Mínimo na definição de doses de fertilizantes?

Capítulo 5

Calagem: por que e como corrigir a acidez

 10.46420/9786585756907cap5

Elen Cristina Fernandes Rosa 

Jorge González Aguilera 

Edilson Costa 

Gustavo Haralampidou da Costa Vieira 

POR QUE FAZEMOS CALAGEM

A **calagem** é a aplicação de **calcário** (rocha moída composta de carbonatos de cálcio e magnésio — CaCO_3 e MgCO_3) para corrigir a acidez do solo. É, via de regra, **a prática de maior retorno econômico da agricultura brasileira**, porque remove de uma só vez as tábuas mais curtas do barril de Liebig dos solos tropicais. Seus efeitos:

- **Neutraliza o Al^{3+} tóxico** ao elevar o pH, o alumínio precipita como hidróxido inofensivo, liberando as raízes para crescer;
- **Eleva o pH** para a faixa de 5,5–6,5, na qual N, P, K, Ca, Mg e S ficam mais disponíveis;
- **Fornece Ca e Mg**, nutrientes escassos nos solos tropicais;
- **Aumenta a eficiência dos fertilizantes** em solo ácido, boa parte do fósforo aplicado é “fixada” e desperdiçada;
- **Melhora a atividade biológica**, incluindo a fixação de N_2 na soja e a decomposição da matéria orgânica.

A QUÍMICA, EM TERMOS SIMPLES

O carbonato reage com a água do solo liberando o íon bicarbonato/hidroxila, que consome H^+ , e o $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ desloca o Al^{3+} do complexo de troca, que então precipita como $\text{Al}(\text{OH})_3$, forma sólida e não tóxica. Em resumo: **o calcário troca “veneno” (H^+ e Al^{3+}) por “alimento” (Ca^{2+} e Mg^{2+}) nas cargas do solo.**

Duas limitações práticas decorrem dessa química:

- O calcário é **pouco solúvel** e o íon carbonato não desce no perfil: o efeito fica praticamente restrito à camada onde foi aplicado/incorporado (0–20 cm). Ele **não corrige a subsuperfície** — para isso existe a gessagem (Capítulo 6);
- A reação é **lenta**: exige umidade e leva de 2 a 3 meses para efeito inicial e até mais de um ano para efeito pleno. Por isso a calagem se faz com antecedência ao plantio.



Figura 9. O que a calagem faz: antes e depois da correção da acidez (infográfico didático da disciplina).

QUANTO APLICAR: O CÁLCULO DA NECESSIDADE DE CALAGEM (NC)

O método mais usado no Brasil Central e em São Paulo é o da **elevação da saturação por bases**: escolhe-se o V% desejado pela cultura (V₂) e calcula-se quanto calcário é preciso para levar o solo do V% atual (V₁) até lá.

Fórmula da saturação por bases

$$NC \text{ (t/ha)} = [(V_2 - V_1) \times T] \div (10 \times PRNT/100)$$

onde: V₂ = saturação por bases desejada (%); V₁ = saturação atual (%); T = CTC a pH 7 (cmolc/dm³); PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total do calcário (%). A fórmula básica (V₂-V₁)×T/100 dá toneladas por hectare para incorporação na camada 0–20 cm, considerando calcário com PRNT 100%; divide-se pelo PRNT real para corrigir a qualidade do produto.

Exemplo completo. Solo de Cerrado: T = 8,0 cmolc/dm³ e V₁ = 30%. Cultura: soja, que pede V₂ = 60%. Calcário disponível: PRNT = 80%.

- Passo 1: NC para PRNT 100%: $(60 - 30) \times 8,0 \div 100 = 2,4 \text{ t/ha}$.
- Passo 2: Correção pelo PRNT: $2,4 \div 0,80 = 3,0 \text{ t/ha de calcário}$.

Valores usuais de V₂: soja e milho, 50–60%; algodão e alfafa, 70%; pastagens braquiárias, 40–50%; café, 60%. Cada estado/região tem tabelas oficiais (ex.: Boletim 100 em SP, manuais da Embrapa para o Cerrado). Em MS usam-se com frequência as recomendações para o Cerrado.

Existe também o **método da neutralização do alumínio** (tradicional em outras regiões): $NC = 2 \times Al^{3+} + [2 - (Ca+Mg)]$, que dimensiona o calcário para neutralizar o Al e suprir Ca+Mg mínimos. Conhecê-lo ajuda a ler artigos, mas o método do V% domina a prática no Centro-Oeste.

QUALIDADE DO CALCÁRIO: PRNT, PN E RE

Nem todo calcário é igual. Três índices definem sua qualidade:

- **PN (Poder de Neutralização)** — capacidade química de neutralizar ácido, expressa em equivalente de CaCO₃ (%);
- **RE (Reatividade)** — rapidez de reação, função da finura de moagem: partículas finas reagem rápido, grossas quase não reagem;
- **PRNT = PN × RE ÷ 100** — combina os dois: é a fração do calcário que efetivamente reagirá em cerca de 3 anos. Calcários com PRNT 90–100% agem rápido (ideais em plantio direto, sem incorporação); PRNT 70–80% agem mais devagar, com efeito mais prolongado.

Quanto ao teor de Mg, o calcário pode ser **calcítico** (pobre em Mg), **magnesiano** ou **dolomítico** (rico em Mg, > 12% MgO). Em solos pobres em Mg — a regra no Cerrado — prefere-se o **dolomítico**, para não criar desequilíbrio Ca/Mg.

COMO APLICAR

- **Época:** idealmente 2–3 meses antes da semeadura, com solo úmido.
- **Modo:** em áreas de implantação/reforma, distribuir a lanço e **incorporar a 0–20 cm** (metade antes da aração, metade antes da gradagem, nas doses altas). Em **plantio direto consolidado**, aplica-se na superfície sem incorporar, em doses menores e mais frequentes, usando calcário de PRNT alto.
- **Excesso é prejudicial** (supercalagem): pH alto demais induz deficiências de micronutrientes (Zn, Mn, Fe, B) e degrada a estrutura. Calagem é correção, não “quanto mais, melhor” — lembre-se de Mitscherlich.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Liste três efeitos benéficos da calagem além da simples elevação do pH.
2. Calcule a necessidade de calagem (t/ha) para elevar V% de 25 para 60 em um solo com $T = 9,0 \text{ cmolc/dm}^3$, usando calcário de PRNT 75%.
3. Explique a diferença entre PN, RE e PRNT. Por que dois calcários com o mesmo PN podem ter desempenhos muito diferentes no campo?
4. Por que a calagem corrige a acidez apenas da camada onde é aplicada/incorporada? Que consequência isso tem para o crescimento de raízes em profundidade?
5. Quando se deve preferir calcário dolomítico ao calcítico? Justifique.
6. O que é supercalagem e quais problemas ela causa?

Capítulo 6

Gessagem: melhorando o ambiente radicular em profundidade

 10.46420/9786585756907cap6

Edson de Lima Bobadilha 

Eduardo Paulino da Costa Silva 

Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho 

Tiago Zoz 

O QUE É O GESSO AGRÍCOLA E O QUE ELE NÃO FAZ

O **gesso agrícola** (sulfato de cálcio di-hidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um subproduto da fabricação de fertilizantes fosfatados (fosfogesso). É fundamental entender desde o início: **gesso não é corretivo de acidez** — ele praticamente **não altera o pH** do solo, pois o sulfato não consome H^+ como o carbonato do calcário. Gessagem **não substitui** calagem; ela a **complementa**.

O que o gesso tem de especial é a **mobilidade**: é cerca de 150 vezes mais solúvel que o calcário, e o par iônico $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ desce no perfil com a água das chuvas, levando cálcio e enxofre para as camadas de 20–40 cm e além — exatamente onde o calcário não chega.

O PROBLEMA QUE A GESSAGEM RESOLVE

Em muitos solos tropicais, mesmo após uma boa calagem na camada 0–20 cm, a **subsuperfície (20–40 cm) continua quimicamente hostil**: pobre em cálcio e/ou com alta saturação por alumínio. Como o cálcio é essencial para o crescimento do ápice radicular e **não transloca dentro da planta** (a raiz precisa encontrá-lo no ponto onde está crescendo), e como o Al^{3+} intoxica as pontas das raízes, o resultado é um **sistema radicular raso**, confinado à camada corrigida.

Por que raiz rasa é tão grave

Uma lavoura de raízes rasas explora menos volume de solo: menos água e menos nutrientes acessíveis. Na primeira estiagem de 10–20 dias (veranico, comuns no Cerrado), a planta esgota a água da camada superficial e sofre déficit hídrico severo — enquanto há água a 40–80 cm que ela não alcança. A gessagem é, na prática, uma **ferramenta de tolerância à seca**: raízes profundas são o melhor seguro contra veranicos.

Ao descer no perfil, o gesso: fornece **Ca^{2+}** à subsuperfície; reduz a atividade tóxica do alumínio (o sulfato forma com o Al o par iônico AlSO_4^+ , menos tóxico, além do deslocamento do Al para formas

menos ativas); e fornece **enxofre (S)**, nutriente cada vez mais deficiente em solos cultivados com fertilizantes concentrados sem S.

Calagem × gessagem: onde cada um age no perfil

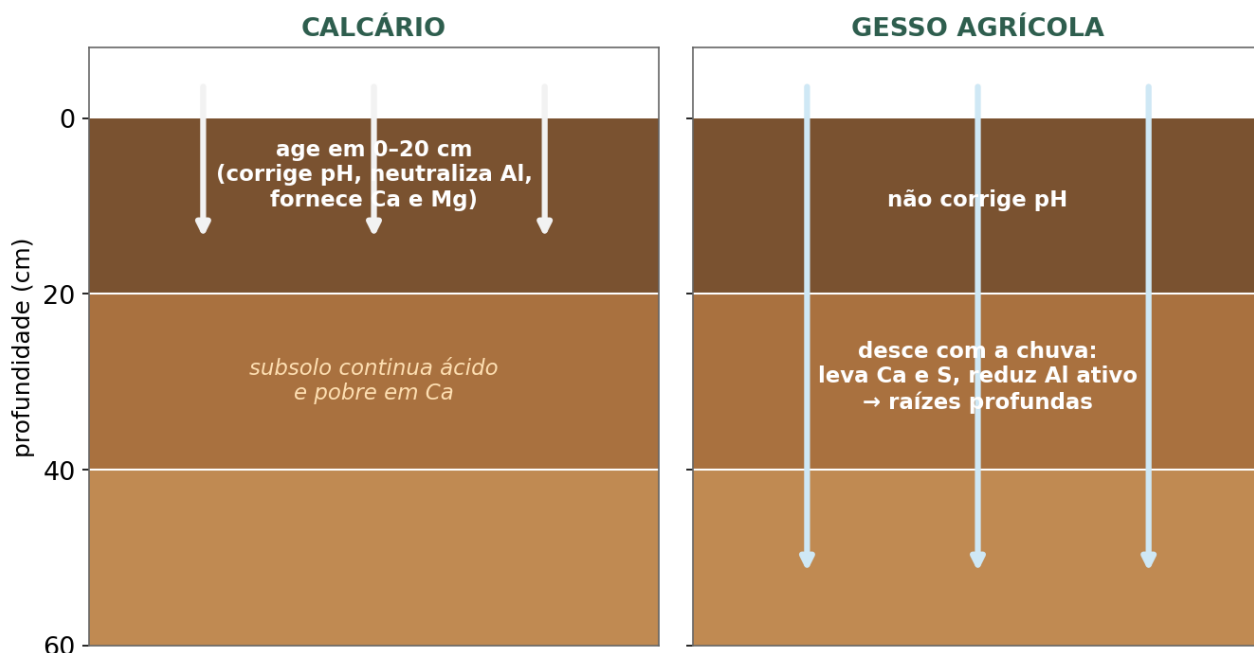


Figura 10. Onde cada corretivo age no perfil: o calcário fica na camada de incorporação; o gesso desce ao subsolo.

QUANDO A GESSAGEM É INDICADA

A decisão exige **análise de solo da camada 20–40 cm** (ou 20–40 e 40–60 cm). Critérios clássicos da pesquisa para o Cerrado — a gessagem é indicada quando, na subsuperfície:

- $\text{Ca}^{2+} < 0,5 \text{ cmolc/dm}^3$; ou
- **saturação por alumínio (m%) > 20%**; ou ainda saturação por Ca na CTC efetiva < 60%.

Se a subsuperfície já é bem suprida de Ca e livre de Al tóxico, a gessagem não trará resposta — mais uma vez a Lei do Mínimo: só corrija a tábua que está curta.

QUANTO APLICAR

A recomendação mais difundida (Embrapa Cerrados) vincula a dose ao **teor de argila**, pois solos mais argilosos retêm mais sulfato e exigem mais gesso:

Doses de gesso (culturas anuais, camada 20–40 cm deficiente)

NG (kg/ha) = 50 × argila (%) — equivale a NG = 5 × argila em g/kg.

Exemplos: solo com 20% de argila → 1.000 kg/ha; 40% de argila → 2.000 kg/ha; 60% de argila → 3.000 kg/ha. Para culturas perenes, usa-se aproximadamente **NG = 75 × argila (%)**. O efeito residual dura em torno de 5 anos ou mais.

Gessagem: melhorando o ambiente radicular em profundidade

Cuidado com o excesso: doses muito altas de gesso podem arrastar (lixiviar) Mg^{2+} e K^+ para fora do alcance das raízes, empobrecendo a camada superficial. Por isso a dose é calculada, o Mg é monitorado nas análises seguintes e a gessagem sempre acompanha um programa de calagem bem feito (o calcário dolomítico repõe Mg).

CALAGEM × GESSAGEM: O QUADRO COMPARATIVO

Aspecto	Calcário	Gesso agrícola
Composição	$CaCO_3$ / $MgCO_3$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Corrige pH?	Sim (é a função principal)	Não
Neutraliza Al^{3+} ?	Sim, na camada incorporada	Reduz a atividade tóxica do Al em profundidade ($AlSO_4^+$), sem neutralizá-lo
Mobilidade no perfil	Praticamente nula (age em 0–20 cm)	Alta — desce ao subsolo com as chuvas
Nutrientes fornecidos	Ca e Mg	Ca e S
Critério de uso	V% baixo / pH baixo / Al na camada arável	Ca baixo ou m% > 20% na camada 20–40 cm
Efeito principal esperado	Fertilidade da camada arável; eficiência de adubos	Aprofundamento de raízes; tolerância a veranicos

PRECISO DE CALCÁRIO OU GESSO?

Como decidir o corretivo certo para o seu solo

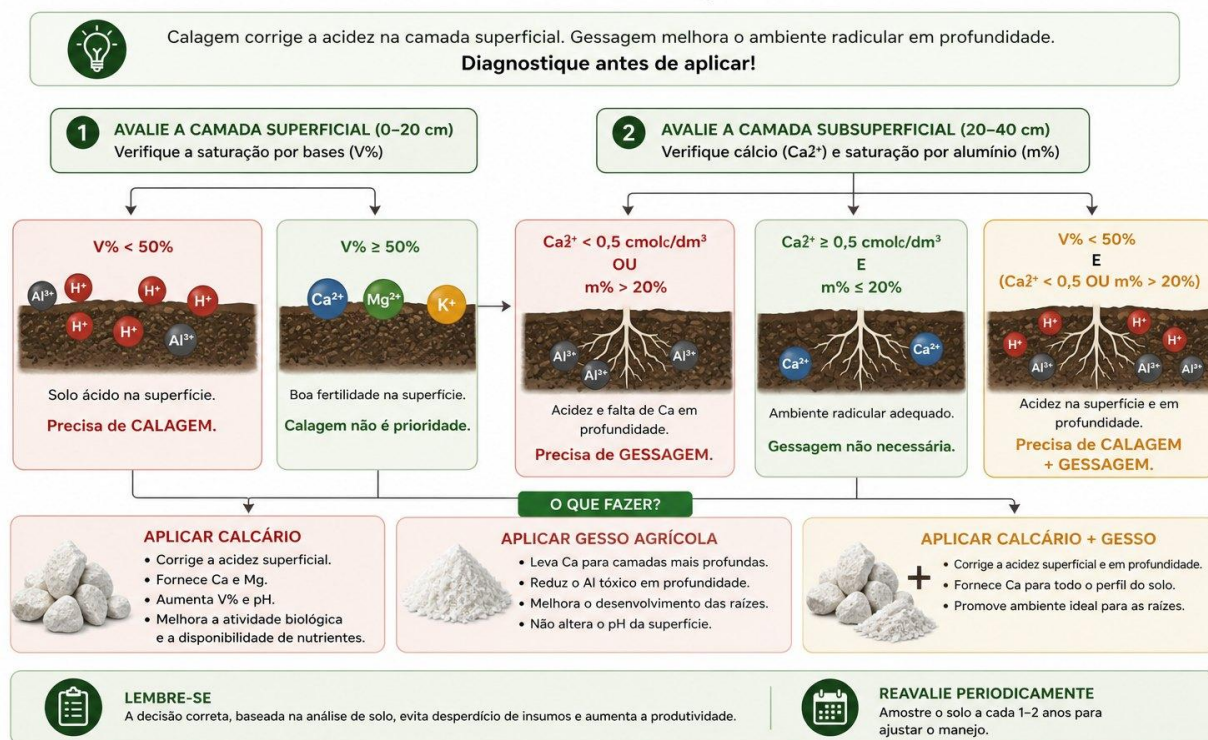


Figura 11. Fluxograma de decisão: preciso de calcário ou de gesso? (infográfico didático da disciplina).

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Por que o gesso agrícola não corrige a acidez do solo, apesar de conter cálcio?
2. Explique o mecanismo pelo qual a gessagem aumenta a tolerância das lavouras aos veranicos.
3. Um solo apresenta, na camada 20–40 cm, $\text{Ca} = 0,3 \text{ cmolc/dm}^3$ e $m = 35\%$. A gessagem é indicada? Calcule a dose para esse solo, que tem 45% de argila (cultura anual).
4. Que risco existe na aplicação de doses excessivas de gesso e como ele é manejado?
5. Um produtor pergunta se pode “trocar o calcário por gesso, que é mais barato”. Elabore a resposta técnica.

Capítulo 7

Compactação do solo

 10.46420/9786585756907cap7

Vitor Augusto Neves 

Bruno Ascoli 

Eduardo Paulino da Costa Silva 

Jorge González Aguilera 

O QUE É E POR QUE ACONTECE

A **compactação** é a redução do volume de poros do solo pela ação de pressões externas: o solo é “amassado”, as partículas se aproximam e os **macroporos são destruídos primeiro**. O resultado é um solo mais denso, duro e menos permeável. Principais causas na agricultura:

- **Tráfego de máquinas com solo úmido** — a causa número 1. O solo úmido (mas não encharcado) está na consistência plástica, em que se deforma como massa de modelar. Colheitadeiras cheias, caminhões de grãos e tratores pesados transitando “no barro” compactam em profundidade;
- **Preparo repetido na mesma profundidade** — grades e arados que sempre trabalham a ~10–20 cm criam uma camada adensada logo abaixo, o famoso “**pé-de-grade**” (ou pé-de-arado);
- **Pisoteio animal** em pastagens superlotadas, especialmente em períodos chuvosos;
- **Baixo teor de matéria orgânica e solo descoberto**, que deixam a estrutura frágil (agravantes).

CONSEQUÊNCIAS

A compactação é uma “tábua curta” física do barril de Liebig, com efeitos em cascata:

- Menos macroporos → **menos oxigênio** para raízes e microrganismos;
- **Resistência mecânica** à penetração: raízes engrossam, entortam e se achatam sobre a camada dura (“raiz em L” ou em “pata de galinha”);
- **Menos infiltração de água** → mais enxurrada e **erosão**, menos recarga do perfil;
- Sistema radicular raso → **maior sensibilidade a veranicos** e menor aproveitamento de nutrientes;
- Encharcamento temporário sobre a camada compactada em anos chuvosos.

Efeito da compactação sobre o sistema radicular

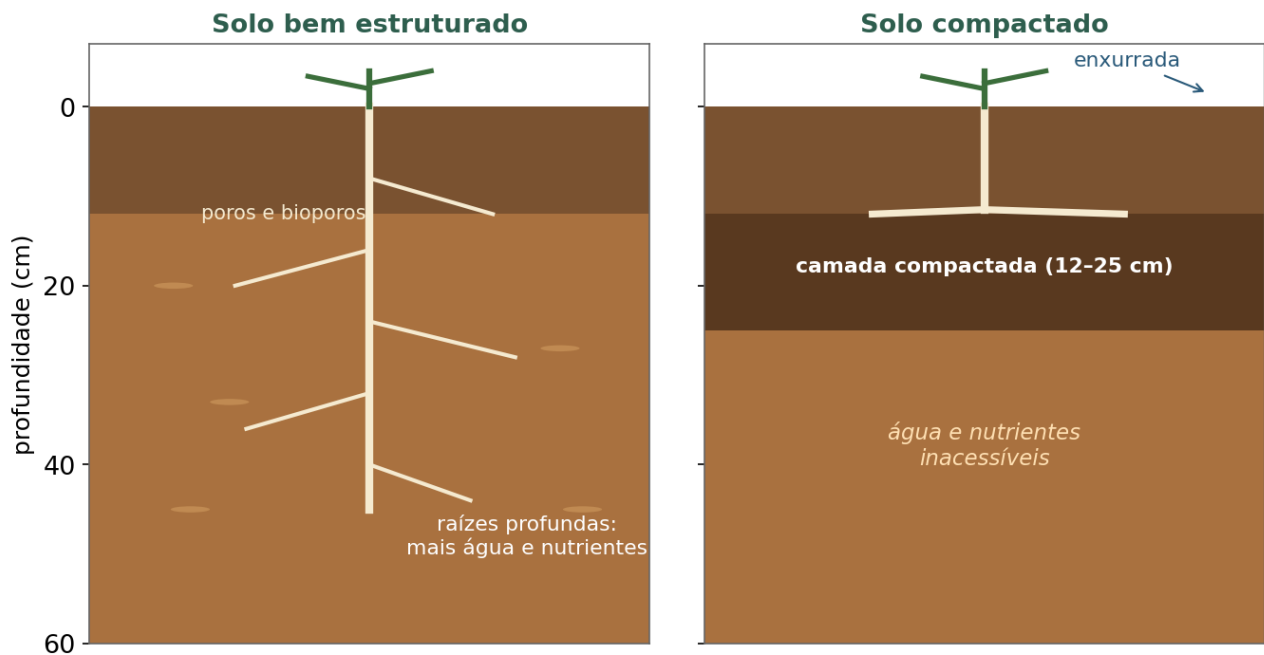


Figura 12. À esquerda, raízes exploram o perfil; à direita, a camada compactada confina as raízes (“raiz em L”) e gera enxurrada.

COMO DIAGNOSTICAR

- **Sinais de campo:** poças persistentes, enxurrada em chuvas fracas, plantas desuniformes que murcham cedo em estiagens, raízes deformadas.
- **Trincheira + avaliação visual** (métodos tipo VESS): abrir mini-trincheiras e observar estrutura, torrões e a distribuição das raízes — o método mais barato e didático.
- **Penetrômetro:** mede a resistência do solo à penetração (RP). Como referência geral, **RP acima de ~2 MPa** (com o solo em umidade próxima à capacidade de campo) já restringe o crescimento radicular da maioria das culturas.
- **Densidade do solo** (anéis volumétricos): comparar com valores críticos — aproximadamente **1,4–1,5 g/cm³ em solos argilosos** e **1,7–1,8 g/cm³ em arenosos** já indicam restrição.

Importante: a RP depende muito da umidade (solo seco parece “compactado” ao penetrômetro). Medições devem ser feitas em umidade adequada e interpretadas com bom senso, sempre confirmadas pela observação das raízes.

Diagnóstico da Compactação do Solo: “Primeiro a trincheira, depois o ferro”

A compactação não é vista na superfície. O diagnóstico começa com a observação das plantas, confirma-se na trincheira e quantifica-se com o penetrômetro.

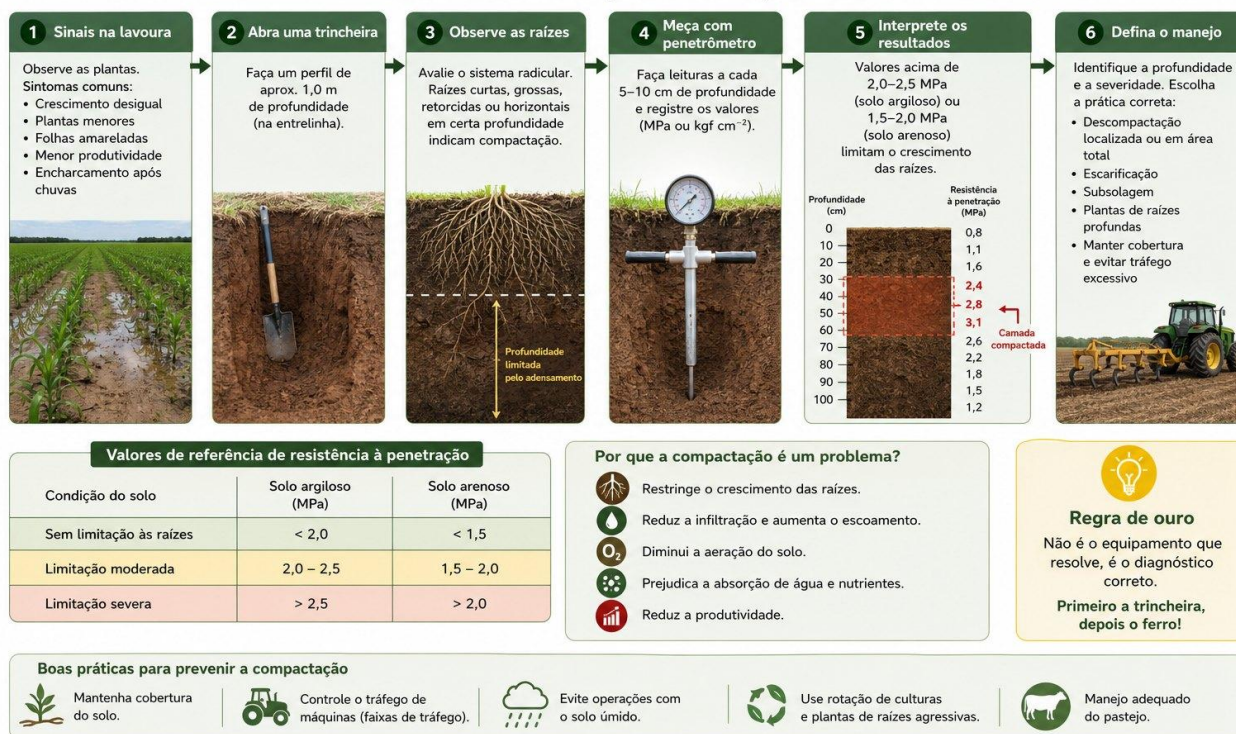


Figura 13. Diagnóstico da compactação em seis passos: “primeiro a trincheira, depois o ferro” (infográfico didático da disciplina).

PREVENÇÃO E CORREÇÃO

Prevenir é muito mais barato que corrigir. As frentes de prevenção são:

- **Não trafegar com solo úmido:** a decisão de manejo mais eficaz e mais difícil de cumprir na prática;
- **Reduzir e organizar o tráfego:** menos operações, pneus adequados/baixa pressão, e idealmente **tráfego controlado** (máquinas sempre nos mesmos rastros);
- **Plantio direto bem conduzido:** palhada permanente + matéria orgânica = estrutura resistente e resiliente;
- **Rotação com plantas de “raízes agressivas”:** a descompactação biológica: braquiárias, nabo forrageiro, crotalárias e guandu criam bioporos estáveis que as raízes das culturas seguintes reutilizam;
- Em pastagens: **ajuste de lotação** e descanso dos piquetes.

Quando a compactação já está instalada e comprovada (trincheira!), recorre-se à **correção mecânica: escarificação** (hastes que rompem camadas até ~25–30 cm) ou **subsolação** (mais profunda, > 30 cm), sempre com o solo mais seco e friável, seguidas **imediatamente** de cultivo com plantas de cobertura abundantes — caso contrário, o solo “solto” e sem estrutura recompacta em 1 ou 2 safras, às vezes pior do que antes.

Erro comum

Escarificar “por via das dúvidas”, a cada ano, sem diagnóstico: gasta-se diesel, destrói-se a palhada e os bioporos, e frequentemente a produtividade não responde — porque a compactação não era o fator limitante, ou porque a recompactação anula o efeito em meses. Regra de ouro: **primeiro a trincheira, depois o ferro.**

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Explique por que trafegar com máquinas em solo úmido é a principal causa de compactação.
2. O que é “pé-de-grade” e como ele se forma?
3. Descreva três métodos de diagnóstico da compactação, do mais simples ao mais instrumentado.
4. Por que a correção mecânica (escarificação/subsolagem) sem mudança do sistema de manejo tende a fracassar?
5. Explique o papel das plantas de cobertura de raízes agressivas na prevenção e correção biológica da compactação.
6. Relacione a compactação do solo à Lei do Mínimo de Liebig.

Capítulo 8

Principais solos do Brasil e suas aptidões

 10.46420/9786585756907cap8

Elen Cristina Fernandes Rosa 
Carlos Eduardo da Silva Oliveira 
Eduardo Paulino da Costa Silva 
Renato Lustosa Sobrinho 

O SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (SiBCS)

O Brasil classifica seus solos pelo **SiBCS** (Embrapa), que organiza os solos em 13 ordens. Para o dia a dia agrônomo, basta dominar as ordens mais extensas e agrícolas, resumidas a seguir. Dois sufixos aparecem o tempo todo e já são seus conhecidos: **eutrófico** ($V \geq 50\%$, fértil) e **distrófico** ($V < 50\%$, pobre); **álico** indica alta saturação por alumínio.

AS ORDENS MAIS IMPORTANTES

Solo (ordem)	Características marcantes	Aptidão e manejo típico
LATOSSOLOS (~32% do Brasil)	Muito profundos, homogêneos, bem drenados, friáveis; relevo plano a suave. Quimicamente pobres e ácidos (maioria distrófica), com forte fixação de P.	A base da agricultura de grãos do Cerrado e de MS. Excelente física + química corrigível: calagem, gessagem e adubação corretiva transformam-nos em solos altamente produtivos e mecanizáveis.
ARGISSOLOS (~26%)	Gradiente textural: horizonte B mais argiloso que o A (o solo “muda” em profundidade). Drenagem e fertilidade variáveis.	Agricultura e pastagens, porém muito suscetíveis à erosão no contato A/B — exigem rigor em práticas conservacionistas (terraceamento, plantio direto, cobertura permanente).
NEOSSOLOS (~13%)	Solos jovens, pouco desenvolvidos. Destaques: N. Quartzarênicos (arenosos profundos, > 70% areia) e N. Litólicos (rasos, sobre rocha).	Quartzarênicos: baixíssimas CTC e retenção de água — manejo de solo arenoso “extremo” (ver Cap. 9); comuns em MS. Litólicos: em geral impróprios para lavoura mecanizada; preservação ou pastejo cuidadoso.

Solo (ordem)	Características marcantes	Aptidão e manejo típico
NITOSSOLOS	Argilosos a muito argilosos, estrutura forte, superfícies brilhantes (“cerosidade”); derivados de basalto (“terra roxa estruturada”, junto a parte dos Latossolos Vermelhos férricos).	Entre os melhores solos agrícolas do país quando eutróficos: grãos, café, cana. Cuidado com compactação por serem argilosos.
CAMBISSOLOS	Pouco desenvolvidos, B incipiente, frequentemente rasos e/ou cascalhentos, em relevos movimentados.	Uso agrícola restrito pelo relevo e profundidade; fruticultura e pastagens em áreas favoráveis; alto risco de erosão.
GLEISSOLOS	Hidromórficos: formados sob encharcamento (cores acinzentadas), em várzeas e baixadas.	Arroz irrigado e pastagens de várzea; exigem drenagem para outros usos; áreas frequentemente protegidas por lei (APP).
PLANOSSOLOS	Mudança textural abrupta com B adensado quase impermeável; comuns em áreas de cota baixa (destaque: Pampa gaúcho).	Clássicos do arroz irrigado no RS; limitação física severa a raízes profundas.
VERTISSOLOS	Argilas expansivas: incham úmidos e fendilham secos; muito férteis.	Férteis, porém física difícil: janela estreita de umidade para preparo; comuns no Pantanal e semiárido.
ORGANOSSOLOS	Constituídos por material orgânico (turfas).	Frágeis; drenados, subsidem e degradam; hortaliças em algumas regiões, mas prioridade é conservação.



Não existe solo bom ou ruim sozinho: a aptidão depende das limitações e do manejo.



CARTEIRA DE IDENTIDADE DOS PRINCIPAIS SOLOS BRASILEIROS



Capítulo 8 — perfil esquemático, característica visual, principal limitação e aptidão de uso



Figura 14. “Carteira de identidade” visual dos principais solos brasileiros (infográfico didático da disciplina).

O caso do Cerrado (e de Mato Grosso do Sul)

O “pacote” que viabilizou a agricultura do Cerrado — uma das maiores revoluções agrícolas do século XX — foi exatamente: Latossolos e Neossolos Quartzarênicos ácidos e distróficos + **calagem + gessagem + adubação corretiva de P e K + variedades adaptadas**. É a aplicação em escala continental dos conceitos desta apostila: identificar as tábuas curtas do barril (Al tóxico, Ca, P) e corrigi-las.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Por que os Latossolos, apesar de quimicamente pobres, são considerados excelentes solos agrícolas?
2. Que característica dos Argissolos os torna especialmente suscetíveis à erosão?
3. Compare Neossolos Quartzarênicos e Nitossolos quanto à textura, CTC e desafios de manejo.
4. O que significam os termos eutrófico, distrófico e álico?
5. Explique, em um parágrafo, o papel da ciência do solo na incorporação do Cerrado à agricultura brasileira.

Capítulo 9

Manejo conforme o tipo de solo: arenoso × argiloso

 10.46420/9786585756907cap9

Edson de Lima Bobadilha 

Gustavo Haralampidou da Costa Vieira 

Jorge González Aguilera 

Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho 

A LÓGICA GERAL

Não existe receita única de manejo: o mesmo pacote tecnológico que funciona num Latossolo argiloso pode fracassar num Neossolo Quartzarênico. A textura comanda a retenção de água e nutrientes, a suscetibilidade à lixiviação, a resistência à compactação e a velocidade de decomposição da matéria orgânica — e, portanto, quase todas as decisões de manejo. Este capítulo organiza as diferenças em forma de guia prático.

SOLO ARENOSO: “PREPARA ASSIM”

Diagnóstico do desafio: pouca argila → CTC baixíssima (a MOS é quase a única fonte de cargas), pouca água disponível, lixiviação intensa de N, K, S e B, estrutura frágil, aquecimento rápido, alto risco de erosão eólica e hídrica. A “despesa” é pequena e furada.

- **Cobertura permanente é inegociável:** plantio direto com palhada abundante (braquiárias, milheto, crotalária) para proteger da erosão, reduzir a temperatura, reter umidade e alimentar a MOS.
- **Construir matéria orgânica** é a estratégia central de longo prazo: cada 1% de MOS a mais representa aumento expressivo de CTC e de água disponível. Integração lavoura-pecuária (ILP) com braquiária é a ferramenta mais eficiente em MS.
- **Adubação parcelada e “a conta-gotas”:** N e K em 2–3 aplicações por ciclo (ou mais, em irrigado), pois doses altas de uma vez são lixiviadas antes de a planta absorver. Preferir fontes de liberação mais lenta quando economicamente viável.
- **Calagem em doses menores e mais frequentes:** a CTC baixa significa que pouco calcário já eleva o V% — doses altas causam supercalagem; reaplica-se com mais frequência, guiado por análises.
- **Gessagem com dose reduzida** ($NG = 50 \times \text{argila\%}$ resulta naturalmente em doses baixas) e atenção redobrada à lixiviação de Mg e K.
- **Monitorar S e micronutrientes (B, Zn),** os primeiros a faltar em solos arenosos.
- **Evitar preparo intensivo:** gradagens aceleram a oxidação da pouca MOS existente e pulverizam a estrutura frágil.

Manejo conforme o tipo de solo: arenoso × argiloso

- **Irrigação, se disponível:** turnos curtos e lâminas menores (o perfil armazena pouco); em sequeiro, priorizar cultivares de ciclo adequado e épocas de menor risco de veranico.

SOLO ARGILOSO: “PREPARA ASSADO”

Diagnóstico do desafio: a “despensa” é grande (CTC e água disponível maiores, mais resiliência a veranicos), mas a física é mais delicada: risco alto de **compactação**, janela estreita de umidade para operações, possível má drenagem, forte **fixação de fósforo** pelos óxidos de Fe e Al.

- **Respeitar o ponto de friabilidade:** operar (plantar, colher, preparar) somente na faixa de umidade certa — nem seco demais (torrões, desgaste) nem úmido (compactação, espelhamento). É a decisão de manejo mais importante nesses solos.
- **Gerenciar o tráfego:** tráfego controlado, pneus de baixa pressão, evitar colheitadeiras/caminhões carregados fora dos carregadores em anos chuvosos.
- **Plantio direto + rotação com raízes agressivas** para manter bioporos e estrutura — a prevenção permanente da compactação.
- **Monitorar camadas compactadas** (trincheiras periódicas) e intervir mecanicamente só com diagnóstico confirmado, sempre seguido de planta de cobertura.
- **Fósforo em foco:** adubação corretiva de P na implantação (a fixação é alta), depois manutenção no sulco; a calagem bem feita reduz a fixação.
- **Calagem em doses maiores** (CTC alta pede mais calcário para mover o V%) e **gessagem com doses maiores** (NG proporcional à argila), com efeito residual longo.
- **Drenagem:** em baixadas argilosas, avaliar necessidade de drenos/camalhões; raízes não toleram falta de O₂.

QUADRO-SÍNTESE

Decisão de manejo	Solo arenoso	Solo argiloso
Estratégia central	Construir e proteger matéria orgânica	Proteger a estrutura física (evitar compactação)
Água	Pouca reserva; alto risco em veranicos; irrigação com turnos curtos	Boa reserva; atenção à drenagem em baixadas
Adubação N e K	Parcelada (2–3+ vezes); risco de lixiviação	Menos parcelamento; risco menor de lixiviação
Fósforo	Menor fixação; doses moderadas	Alta fixação; adubação corretiva + manutenção
Calagem	Doses menores e mais frequentes (CTC baixa)	Doses maiores, reaplicação menos frequente
Gessagem	Doses baixas (50 × argila%); vigiar Mg/K	Doses maiores; ótima resposta em subsolo álico
Tráfego/preparo	Evitar revolvimento (perda de MOS)	Evitar tráfego úmido (compactação); janela de umidade
Riscos dominantes	Lixiviação, erosão, veranico, baixa CTC	Compactação, erosão em Argissolos, fixação de P
Ferramenta-chave regional	ILP com braquiária; milho na safrinha	Plantio direto consolidado; rotação com braquiária/nabo

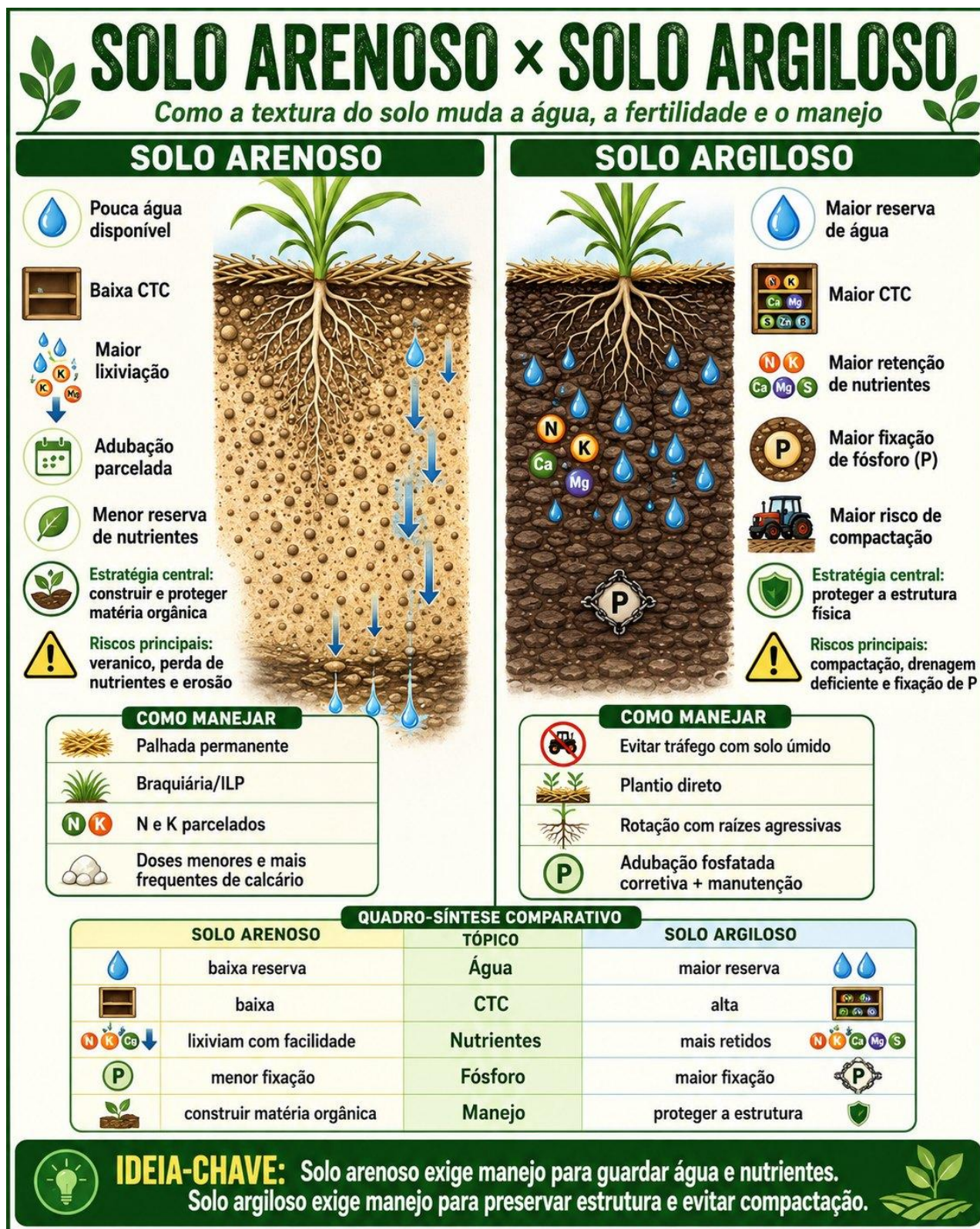


Figura 15. Solo arenoso × solo argiloso: como a textura muda a água, a fertilidade e o manejo (infográfico didático da disciplina).

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Por que o parcelamento da adubação nitrogenada e potássica é mais importante em solos arenosos?
2. Explique por que a calagem em solo arenoso usa doses menores, porém mais frequentes, que em solo argiloso.
3. Qual é a “estratégia central” de manejo de um solo arenoso e qual a de um solo argiloso? Justifique cada uma.
4. Um produtor de solo argiloso pergunta se pode colher soja com o solo úmido “para não atrasar”. Quais os riscos e que alternativas você discutiria?
5. Descreva o papel da integração lavoura-pecuária (ILP) com braquiária na melhoria de solos arenosos.

Capítulo 10

Erosão, proteção do solo e sistemas de preparo

 10.46420/9786585756907cap10

Vitor Augusto Neves 

Edilson Costa 

Tiago Zoz 

Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho 

EROSÃO: A PERDA “INVISÍVEL” DE FERTILIDADE

A **erosão hídrica** é o desprendimento e o transporte de partículas do solo pela água das chuvas. Ela é a principal forma de degradação de terras agrícolas no Brasil — e o mais grave é que **a erosão leva embora justamente a parte mais valiosa do solo**: a camada superficial, onde se concentram a matéria orgânica, o fósforo, os nutrientes da adubação e o calcário recém-aplicado.

O sedimento arrastado pela enxurrada é **“enriquecido”**: por ser composto das partículas mais leves e finas (argila e matéria orgânica, exatamente as que carregam a CTC), ele contém proporcionalmente **mais nutrientes do que o solo que ficou**. Em outras palavras, cada tonelada de solo erodido vale mais do que uma tonelada de solo médio — perde-se adubo, corretivo e “despesa” (CTC) de uma vez. Some-se a isso o prejuízo fora da lavoura: assoreamento e poluição de rios e reservatórios com sedimentos, fósforo e agrotóxicos.

As formas de erosão hídrica, em ordem crescente de visibilidade (e não de importância):

- **Erosão laminar**: remoção de uma “lâmina” fina e uniforme da superfície. É **a mais traiçoeira**: quase invisível, mas responde pela maior parte da perda de solo e nutrientes. Sinais indiretos: raízes e pedras expostas, manchas claras nas partes altas do terreno, produtividade caindo sem causa aparente.
- **Erosão em sulcos**: a enxurrada se concentra e escava canais visíveis, que atrapalham as operações.
- **Voçoroca (erosão em ravinas profundas)**: estágio extremo: valas enormes, muitas vezes atingindo o lençol freático; a recuperação é caríssima e a área fica perdida para a agricultura.

Em solos arenosos descobertos e regiões de ventos fortes ocorre também a **erosão eólica** — o vento arrasta as partículas finas da superfície.

COMO A EROSÃO COMEÇA: A GOTA DE CHUVA

A erosão não começa com a enxurrada: começa com o **impacto da gota de chuva** sobre o solo descoberto (efeito *splash*). A gota, caindo a até ~30 km/h, explode os agregados superficiais, desprende

Manejo conforme o tipo de solo: arenoso × argiloso

partículas e forma uma fina crosta que **entope os poros e sela a superfície** (encrostamento). Com a infiltração reduzida, a água passa a escorrer — e a enxurrada, ganhando volume e velocidade morro abaixo, arrasta o solo desagregado.

A conclusão prática mais importante deste capítulo

Se a erosão começa no impacto da gota, **a defesa número 1 é nunca deixar o solo nu**: manter a superfície permanentemente coberta por palhada e/ou plantas vivas. A cobertura absorve a energia da gota, mantém os poros abertos (a água infiltra em vez de escorrer), reduz a velocidade da enxurrada e ainda alimenta a matéria orgânica. Cobertura morta bem manejada chega a reduzir as perdas de solo em mais de 90% em relação ao solo descoberto.



Figura 16. Como a erosão começa: da gota de chuva à voçoroca (infográfico didático da disciplina).
PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS: AS TRÊS FRENTES

O controle da erosão combina práticas de três naturezas, que se somam:

- **Práticas vegetativas** (a base): palhada permanente (plantio direto), plantas de cobertura na entressafra (milheto, braquiárias, crotalárias), rotação de culturas, faixas de vegetação, cultivo em faixas e proteção de nascentes e matas ciliares.

- **Práticas edáficas:** manter o solo “forte”: calagem e adubação adequadas (planta bem nutrida cobre o solo mais rápido), elevação da matéria orgânica (agregados mais estáveis resistem à gota) e não queimar resíduos.
- **Práticas mecânicas:** obras que disciplinam a enxurrada quando as anteriores não bastam: **plantio em nível (curvas de nível)**, semear cortando o sentido do declive, para que cada linha funcione como mini-barreira; **terraceamento**, camalhões e canais construídos em nível ou com leve gradiente, que interceptam a enxurrada e a fazem infiltrar ou escoar devagar; **bacias de captação (“barraginhas”)** ao longo de estradas rurais; e locação correta de **carreadores e estradas** (grandes iniciadoras de voçorocas quando mal posicionadas).

Importante: terraço não substitui cobertura. Terraceamento sem palhada é “enxugar gelo” — o terraço apenas administra uma enxurrada que a cobertura teria evitado. Por outro lado, em declives mais fortes e chuvas intensas, mesmo o plantio direto precisa do apoio dos terraços: o dimensionamento é caso a caso.



Figura 17. As três barreiras contra a erosão: vegetativa, edáfica e mecânica (infográfico didático da disciplina).

PREPARO CONVENCIONAL × PLANTIO DIRETO

O **preparo convencional** (aração + gradagens a cada safra) domina a agricultura mundial há séculos: revolve o solo para descompactar a superfície, incorporar corretivos e resíduos e controlar plantas daninhas. Seus custos ocultos, porém, são altos em clima tropical: solo meses descoberto entre o preparo e o fechamento da cultura (janela de máxima erosão), oxidação acelerada da matéria orgânica, destruição dos agregados e dos bioporos, formação de pé-de-grade e maior consumo de combustível e tempo.

O **Sistema Plantio Direto (SPD)** — do qual o Brasil é referência mundial, com dezenas de milhões de hectares — inverte a lógica: a semente é depositada por uma semeadora especial em um estreito sulco aberto na palhada, sem nenhum revolvimento. O SPD se apoia em **três pilares inseparáveis**:

- **Revolvimento mínimo (ou nulo)** do solo: preserva estrutura, bioporos e matéria orgânica;
- **Cobertura permanente**: palhada sempre sobre a superfície, protegendo contra gota, temperatura e evaporação;
- **Rotação de culturas**: diversidade de espécies e de raízes, quebra de ciclos de pragas e doenças, produção contínua de palha.

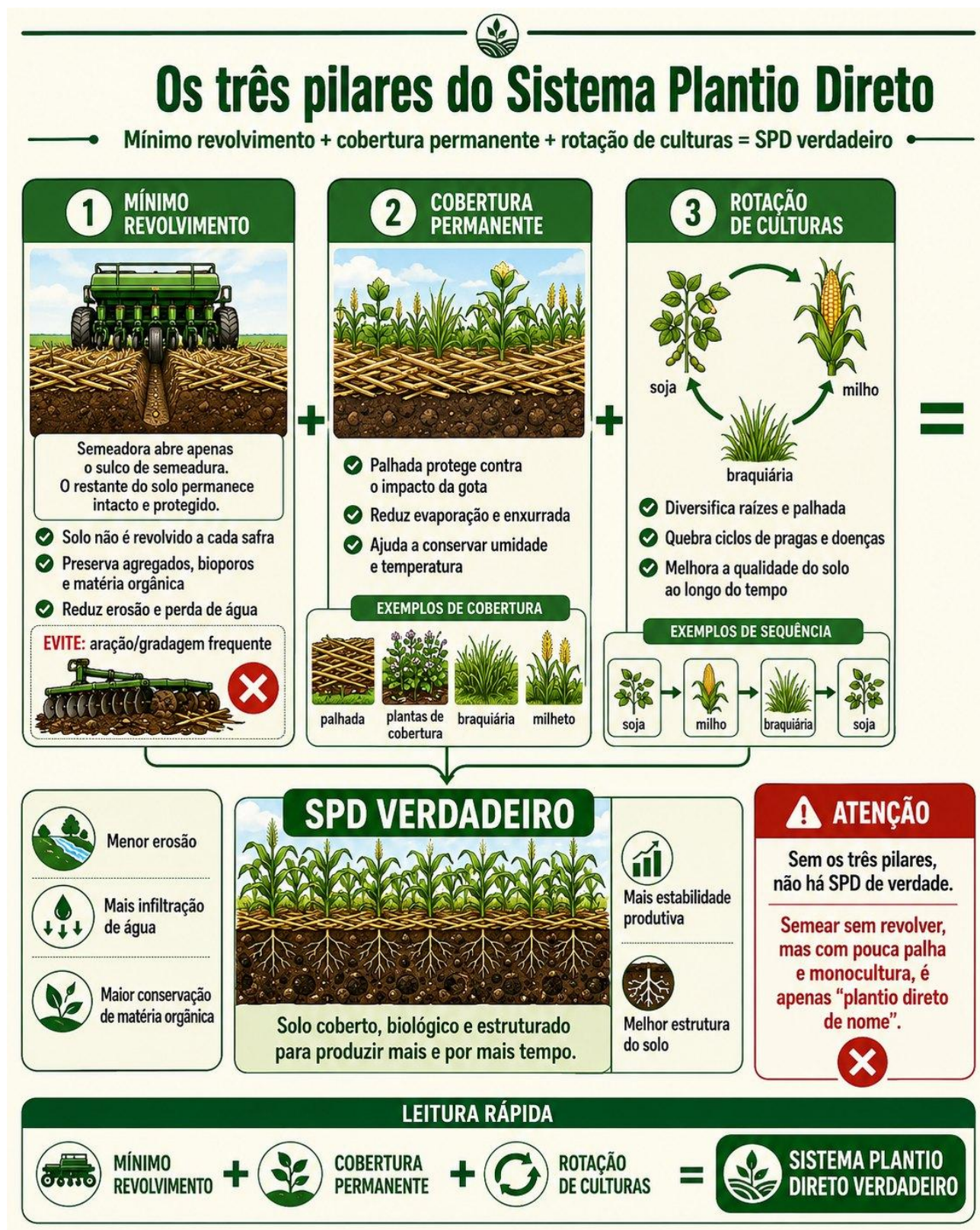


Figura 18. Os três pilares do Sistema Plantio Direto (infográfico didático da disciplina).

Sem os três pilares não há SPD de verdade — semear sem revolver, mas em monocultura e com pouca palha, é apenas “plantio direto de nome”, e acumula problemas (compactação, pragas de solo, daninhas resistentes).

Aspecto	Preparo convencional	Sistema Plantio Direto (SPD)
Revolvimento	Aração + gradagens a cada safra	Nenhum; apenas o sulco de semeadura
Cobertura do solo	Solo descoberto por semanas/meses	Palhada permanente (meta: 100% de cobertura)
Perdas por erosão	Altas (solo exposto à gota e à enxurrada)	Reduzidas em até 90% ou mais
Matéria orgânica	Oxidação acelerada; MOS cai ao longo dos anos	Acúmulo gradual; MOS sobe (sequestro de C)
Água	Menos infiltração, mais evaporação	Mais infiltração e armazenamento; menos veranico
Estrutura e vida do solo	Agregados e bioporos destruídos a cada safra	Estrutura e fauna (minhocas etc.) preservadas
Calagem	Incorporada a 0–20 cm	Superficial, doses menores e mais frequentes (PRNT alto)
Custo operacional	Mais operações, diesel e tempo	Menos operações; exige semeadora adequada e manejo de daninhas
Riscos/desafios	Erosão, degradação da MOS, pé-de-grade	Compactação superficial por tráfego, daninhas resistentes, exige rotação de verdade

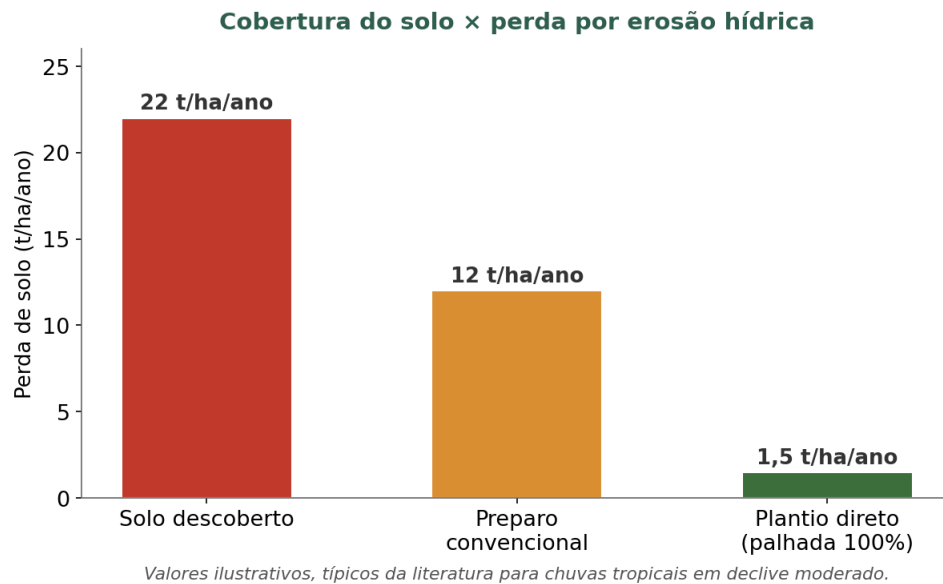


Figura 19. Efeito da cobertura do solo sobre as perdas por erosão hídrica (valores ilustrativos da literatura).

Em resumo: o preparo convencional resolve problemas de curto prazo criando problemas de longo prazo; o SPD investe no longo prazo (estrutura, MOS, água) e por isso é o sistema recomendado para a agricultura tropical — desde que praticado com seus três pilares e integrado às demais práticas desta apostila (calagem superficial criteriosa, gessagem, controle de tráfego, terraços, onde necessário).

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Por que se diz que o sedimento levado pela erosão é “enriquecido”? Que consequência isso tem para o custo real da erosão?
2. Explique por que a erosão laminar, apesar de quase invisível, é considerada a mais perigosa.
3. Descreva o papel do impacto da gota de chuva no início do processo erosivo e relacione-o à importância da cobertura do solo.
4. Classifique as práticas conservacionistas em vegetativas, edáficas e mecânicas, dando dois exemplos de cada.
5. Quais são os três pilares do Sistema Plantio Direto? Por que semear sem revolver, mas em monocultura e sem palha, não caracteriza SPD verdadeiro?
6. Compare preparo convencional e plantio direto quanto a: erosão, matéria orgânica e disponibilidade de água para as plantas.

Capítulo 11

Guia prático: interpretando a análise de solo e decidindo a correção

 10.46420/9786585756907cap11

Bruno Ascoli 

Renato Lustosa Sobrinho 

Eduardo Paulino da Costa Silva 

Jorge González Aguilera 

Este capítulo é o fechamento prático da apostila: um roteiro para você pegar um **laudo de análise de solo** (o documento que o laboratório devolve) e transformá-lo em decisões de manejo, usando tudo o que foi visto nos capítulos anteriores. A análise de solo é o exame de sangue da lavoura: barata (custa uma fração mínima do valor dos corretivos), rápida e a única forma objetiva de descobrir qual é a “tábua curta” química do barril de Liebig.

ANTES DO LAUDO: A AMOSTRAGEM É 90% DO RESULTADO

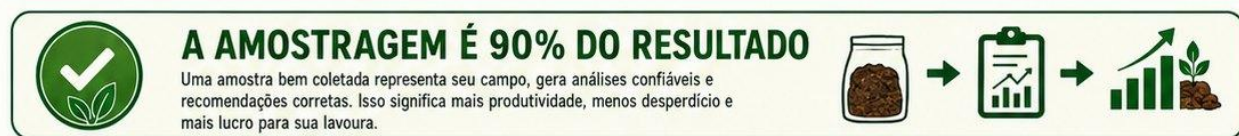
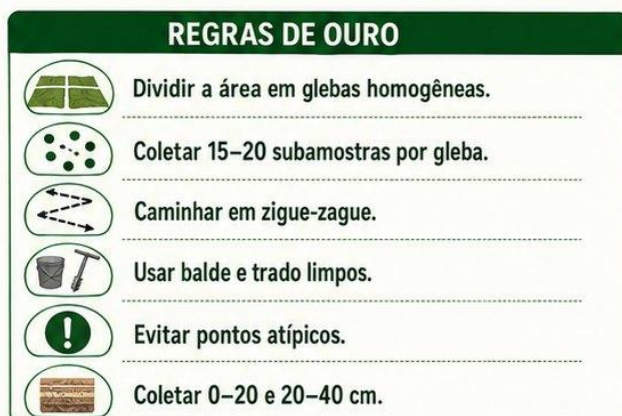
Nenhum laboratório conserta uma amostra mal coletada. O laudo representa milhões de quilos de solo (um hectare de 0–20 cm pesa ~2 milhões de kg) a partir de ~300 gramas analisados — o erro de amostragem é, de longe, a maior fonte de erro do processo. Regras de ouro:

- **Divida a área em glebas homogêneas** (mesmo solo, mesma cor, mesma posição no relevo, mesmo histórico de uso). Cada gleba = uma amostra composta. Nunca misture “mancha de areião” com baixada argilosa.
- **Colete 15 a 20 subamostras por gleba**, caminhando em zigue-zague, e misture-as bem em um balde limpo; dessa mistura, retire ~300–500 g para o laboratório (a **amostra composta**).
- **Profundidades:** 0–20 cm (fertilidade e calagem) e **20–40 cm** (decisão de gessagem — Capítulo 6).
- **Evite pontos atípicos:** formigueiros, cupinzeiros, linhas de adubação antigas, próximo a estradas, currais e depósitos de calcário.
- **Época:** idealmente após a colheita e **antes** do período de correção, todos os anos (ou a cada 2 anos em sistemas estáveis), sempre na mesma época para permitir comparação.
- **Balde e trado limpos** (sem resíduo de adubo ou calcário) — contaminações mínimas distorcem P e K.



Como fazer uma amostragem de solo

Do campo ao laboratório: a coleta correta é a base de uma boa recomendação



Amostre certo hoje para colher melhores resultados amanhã!

Figura 20. Como fazer uma amostragem de solo: do campo ao laboratório (infográfico didático da disciplina).

LENDO O LAUDO: O QUE É CADA NÚMERO

Os laudos variam de laboratório para laboratório, mas quase todos trazem os itens abaixo. A tabela resume o que cada um significa e faixas orientativas de interpretação para culturas anuais (valores gerais, no espírito das tabelas do Cerrado — consulte sempre a tabela oficial da sua região e o extrator usado pelo laboratório):

Parâmetro (unidade)	O que mede	Interpretação orientativa
pH em CaCl ₂	Acidez ativa (o pH em CaCl ₂ é ~0,5 a 0,7 unidade menor que em água)	Muito ácido: < 4,5 Ácido: 4,5–5,0 Adequado: 5,0–5,8 Alto: > 6,0
M.O. (g/dm ³)	Matéria orgânica	Baixa: < 15 Média: 15–30 Boa: > 30 (interpretar junto com a textura: em arenoso, 20 já é bom)
P (mg/dm ³)	Fósforo “disponível” (extrator Mehlich-1 ou resina)	Depende fortemente da argila (Mehlich-1): em solo argiloso, < 5 é baixo e > 12 é adequado; em arenoso, < 10 é baixo e > 18 é adequado
K (cmolc/dm ³)	Potássio trocável (0,1 cmolc ≈ 39 mg/dm ³)	Baixo: < 0,15 Médio: 0,15–0,30 Adequado: > 0,30
Ca (cmolc/dm ³)	Cálcio trocável	Baixo: < 1,5 Adequado: 1,5–7,0
Mg (cmolc/dm ³)	Magnésio trocável	Baixo: < 0,5 Adequado: 0,5–2,0
Al (cmolc/dm ³)	Alumínio trocável (tóxico)	Ideal: 0 Problema: > 0,5 (avaliar junto com m%)
H+Al (cmolc/dm ³)	Acidez potencial	Quanto maior, mais calcário será preciso para mover o V%
SB (cmolc/dm ³)	Soma de bases = Ca + Mg + K	Calculada; alimenta V%
T (cmolc/dm ³)	CTC a pH 7 = SB + (H+Al)	Baixa: < 5 (típica de arenosos) Média: 5–10 Alta: > 10
V (%)	Saturação por bases = $SB/T \times 100$	O número-resumo da fertilidade: < 50% distrófico; alvo típico de 50–60% para grãos

Parâmetro (unidade)	O que mede	Interpretação orientativa
m (%)	Saturação por alumínio	Sem problema: < 20% Limitante: > 20% Grave: > 50%
S (mg/dm ³)	Enxofre (fase 0–20 cm subestima; ver 20–40)	Baixo: < 10 (na camada 20–40 cm)
B, Zn, Cu, Mn, Fe (mg/dm ³)	Micronutrientes	Referências próprias por extrator; atenção a B e Zn no Cerrado (frequentemente baixos)

Atenção às unidades — armadilha clássica

Laboratórios podem expressar K e P em **mg/dm³** e os demais cátions em **cmolc/dm³**. Para somar o K na SB, converta: **K (cmolc/dm³) = K (mg/dm³) ÷ 390**. Ex.: K = 78 mg/dm³ → 0,20 cmolc/dm³. Verifique também se a M.O. está em g/dm³ ou em % (1% = 10 g/dm³) e qual foi o extrator de P (Mehlich-1 ou resina) — as tabelas de interpretação são diferentes para cada um.

O ROTEIRO DE INTERPRETAÇÃO EM 7 PASSOS

Diante de qualquer laudo, siga sempre a mesma sequência, ela reproduz a ordem de prioridade das correções:

- **Passo 1: Confira a acidez e o alumínio (0–20 cm):** olhe pH, Al e m%. pH baixo + Al presente + m% > 20% = primeira tábua curta identificada.
- **Passo 2: Calcule/verifique SB, T e V%:** se o laudo não trouxer, calcule você mesmo (Capítulo 3). Compare o V% atual com o V% exigido pela cultura (soja/milho: 50–60%).
- **Passo 3: Decida a calagem:** se V% atual < V% desejado, calcule NC pela fórmula do Capítulo 5, ajuste pelo PRNT e defina época e modo de aplicação.
- **Passo 4: Olhe a camada 20–40 cm:** Ca < 0,5 cmolc/dm³ ou m% > 20%? Se sim, calcule a gessagem (NG = 50 × argila%, Capítulo 6).
- **Passo 5: Avalie P e K:** compare com as faixas para a textura do solo. Se baixos, planeje adubação corretiva (construção) além da adubação de manutenção da cultura.
- **Passo 6: Cheque M.O., S e micronutrientes:** M.O. baixa é um alerta de sistema (mais palhada, rotação, ILP); S e B/Zn baixos entram no plano de adubação.
- **Passo 7: Lembre-se do que o laudo NÃO mostra:** compactação, erosão, água. Análise química boa não descarta trincheira (Capítulo 7). O diagnóstico completo é químico e físico.

Da química à decisão: um roteiro para transformar números em produtividade



Figura 21. O roteiro de interpretação da análise de solo em 7 passos, em versão visual (infográfico didático da disciplina).

EXEMPLO COMPLETO RESOLVIDO, PASSO A PASSO

Laudo (fictício) de uma gleba de 50 ha em Latossolo de Cerrado, textura argilosa (**argila = 38%**), para plantio de **soja** ($V_2 = 60\%$). Calcário disponível: dolomítico, **PRNT 85%**.

Parâmetro	Camada 0–20 cm	Camada 20–40 cm
pH (CaCl ₂)	4,6	4,4
M.O. (g/dm ³)	18	—
P Mehlich (mg/dm ³)	4	—
K (cmolc/dm ³)	0,12	—
Ca (cmolc/dm ³)	1,0	0,3
Mg (cmolc/dm ³)	0,4	0,1
Al (cmolc/dm ³)	0,6	0,8
H+Al (cmolc/dm ³)	5,2	—

- **Passo 1: Acidez e Al (0–20 cm):** pH 4,6 em CaCl₂ = solo muito ácido; Al = 0,6 cmolc/dm³ presente. CTC efetiva = SB + Al. Vamos calcular a SB primeiro.
- **Passo 2: SB, T e V%:** SB = 1,0 + 0,4 + 0,12 = **1,52 cmolc/dm³**. T = 1,52 + 5,2 = **6,72 cmolc/dm³**. V% = $1,52 \div 6,72 \times 100 = 22,6\%$ — bem abaixo dos 60% que a soja pede: solo distrófico, calagem obrigatória. Confirmando o Al: CTC efetiva = 1,52 + 0,6 = 2,12; m% = $0,6 \div 2,12 \times 100 = 28\%$ — acima de 20%, alumínio limitante.
- **Passo 3: Cálculo da calagem:** NC = $(60 - 22,6) \times 6,72 \div 100 = 2,5 \text{ t/ha}$ (PRNT 100%). Ajustando: $2,5 \div 0,85 = 2,96 \approx 3,0 \text{ t/ha de calcário dolomítico}$ (dolomítico porque o Mg = 0,4 está baixo), aplicado 2–3 meses antes da semeadura. Para os 50 ha: 150 t.
- **Passo 4: Subsuperfície (20–40 cm):** Ca = 0,3 < 0,5 cmolc/dm³ e m% alto (0,8 de Al com pouquíssimas bases). Os dois critérios indicam **gessagem**: NG = $50 \times 38 = 1.900 \text{ kg/ha} \approx 1,9 \text{ t/ha de gesso}$, junto com a calagem.
- **Passo 5: P e K:** P = 4 mg/dm³ em solo argiloso = **baixo** → adubação fosfatada corretiva na implantação + manutenção no sulco. K = 0,12 cmolc/dm³ = **baixo** → adubação potássica corretiva, parcelada se houver risco de lixiviação.
- **Passo 6: M.O.:** 18 g/dm³ em solo argiloso = baixa para o potencial do solo → reforçar palhada, considerar braquiária na entressafra.
- **Passo 7: O que o laudo não mostrou:** antes de investir, abrir trincheiras para checar compactação — a área vinha de pastagem degradada com pisoteio.

Resumo da prescrição do exemplo

- 1) Calcário dolomítico PRNT 85: **3,0 t/ha**, incorporado (área em implantação), 2–3 meses antes do plantio.
- 2) Gesso agrícola: **1,9 t/ha**, a lanço, junto à calagem.
- 3) Adubação corretiva de P e K conforme tabela regional + manutenção no sulco.
- 4) Braquiária/milheto para palhada e M.O.
- 5) Trincheiras para diagnóstico físico.
- 6) Reamostrar em 12–18 meses para conferir a evolução (V%, Mg, K).

ERROS COMUNS DE PRINCIPIANTE (E COMO EVITÁ-LOS)

- **Interpretar P sem olhar a argila e o extrator:** o mesmo “P = 8” é adequado num arenoso e baixo num argiloso; Mehlich e resina têm tabelas diferentes.
- **Somar K em mg/dm³ direto na SB:** sempre converta para cmolc/dm³ ($\div 390$).
- **Calcular calagem sem ajustar pelo PRNT:** subdosagem garantida (10 a 30% a menos).
- **Ignorar a camada 20–40 cm:** perde-se o diagnóstico da gessagem e a explicação de raízes rasas.
- **Corrigir o que não está limitando:** V% já em 60% não pede calagem “de segurança”; excesso causa supercalagem (Capítulo 5) e desperdiça dinheiro (Lei do Mínimo!).
- **Confiar num laudo de amostragem ruim:** resultado estranho ou muito diferente do histórico? Desconfie da coleta antes de mudar o manejo.
- **Esquecer que o laudo é químico:** produtividade baixa com laudo bom = procure a resposta na física (compactação), na água ou na sanidade, não em mais adubo.

Síntese final da apostila

Manejar solo é aplicar a Lei do Mínimo em ciclos: **amostrar e analisar** (0–20 e 20–40 cm; trincheira), **identificar a tábuas mais curta** (acidez? Ca no subsolo? P? compactação? erosão? água?), **corrigir com a prática certa** (calagem, gessagem, adubação, descompactação, cobertura, terraceamento) **na dose certa**, e **monitorar** para achar a próxima tábuas. Química, física e conservação caminham juntas: não há fertilidade que compense um solo sem estrutura, nem estrutura que compense um solo intoxicado por alumínio — e nada disso sobrevive se a camada fértil for embora com a enxurrada.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Por que se diz que “a amostragem é 90% do resultado” da análise de solo? Cite três regras para uma boa coleta.
2. Um laudo traz $K = 117 \text{ mg/dm}^3$. Converta para cmolc/dm^3 e classifique (baixo, médio ou adequado).
3. Interprete o laudo a seguir (0–20 cm, solo com 50% de argila, cultura: milho, $V_2 = 60\%$): pH $\text{CaCl}_2 = 5,6$; M.O. = 32 g/dm^3 ; $P = 15 \text{ mg/dm}^3$; $K = 0,35$; $\text{Ca} = 3,2$; $\text{Mg} = 1,1$; $\text{Al} = 0,0$; $\text{H} + \text{Al} = 3,0$ (cmolc/dm^3). Calcule SB, T, V% e diga se é necessária calagem.
4. Para o laudo do exercício 3, a camada 20–40 cm mostrou $\text{Ca} = 1,2 \text{ cmolc/dm}^3$ e $m = 5\%$. A gessagem é indicada? Justifique.
5. Calcule a dose de calcário (PRNT 90%) para elevar o V% de 35 para 55 em um solo com $T = 11 \text{ cmolc/dm}^3$.
6. Um produtor recebeu laudo com todos os índices químicos adequados, mas a produtividade segue caindo. Usando o “Passo 7” do roteiro, explique onde ele deve procurar o problema e com quais ferramentas.

Capítulo 12

Modelagem matemática

 10.46420/9786585756907cap12

Bruno Rodrigues de Oliveira 

LEI DE MITSCHERLICH E A DOSE ECONÔMICA ÓTIMA

No Capítulo 4, introduzimos a leitura moderna da Lei do Mínimo, destacando a Lei dos Rendimentos Decrescentes de Mitscherlich. Vimos que, ao corrigir o fator limitante, a resposta da planta é grande no início, mas vai diminuindo à medida que se aproxima da suficiência, o que nos alerta que não existe a regra do “quanto mais, melhor”. Para traduzir esse comportamento biológico em rentabilidade financeira, precisamos modelar essa curva matematicamente.

A função clássica que descreve o rendimento das culturas em resposta à adição de um nutriente é uma curva exponencial assintótica. A equação pode ser expressa da seguinte forma:

$$Y(x) = A(1 - e^{-cx})$$

onde $Y(x)$ é a produtividade esperada (ex: sacas ha^{-1}) em função da dose aplicada; A é a produtividade máxima possível para aquelas condições edafoclimáticas e genéticas (a assíntota da curva); c é o coeficiente de eficiência do nutriente o qual indica a rapidez com que a produtividade se aproxima do máximo; e, x é a dose do nutriente aplicada ao solo (ex: kg ha^{-1}).

O objetivo de uma operação agrícola sustentável não é atingir a produtividade biológica máxima (A), mas obter o lucro máximo. O lucro é definido pela receita total subtraída dos custos. Se P_y é o preço de venda do produto agrícola e P_x é o custo do fertilizante, a Dose Econômica Ótima (DEO) é encontrada no ponto exato em que a receita marginal se iguala ao custo marginal.

Utilizando o cálculo diferencial, derivamos a função de produtividade em relação à dose (x) e igualamos à relação de preços, isto é:

$$\frac{dY}{dx} = \frac{P_x}{P_y}$$

Derivando a equação pela regra da cadeia obtemos:

$$\frac{d}{dx} [A \cdot (1 - e^{-cx})] = A \cdot c \cdot e^{-cx}$$

e, igualando a derivada à relação de troca entre o insumo e o produto, ou seja:

$$A \cdot c \cdot e^{-cx} = \frac{P_x}{P_y}$$

encontramos a fórmula definitiva da Dose Econômica Ótima x_{opt} , a dose que maximiza o lucro, ao isolarmos a variável x e aplicarmos o logaritmo natural ($\ln$) em ambos os lados da equação:

$$x_{opt} = \frac{1}{c} \ln \left(\frac{A \cdot c \cdot P_y}{P_x} \right)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO PRÁTICA

Considere o planejamento de uma safra de soja em um Latossolo de textura argilosa no Cerrado. No Capítulo 9 advertimos que solos argilosos exigem atenção especial, pois apresentam maior fixação de fósforo (P), portanto, a adubação fosfatada é um investimento crítico, mas que obedece estritamente à lei dos rendimentos decrescentes.

Suponha que calibrações regionais para essa gleba específica nos forneçam os seguintes parâmetros: Produtividade máxima alcançável (A): 80 sacas ha^{-1} ; Coeficiente de eficiência do fósforo no solo (c): 0,04; Preço de venda da saca de soja (P_y): R\$ 120,00; Custo do quilo do nutriente P_2O_5 aplicado (P_x): R\$ 6,00. Substituindo os valores na nossa equação de otimização, obtemos:

$$x_{opt} = \frac{1}{0,04} \ln \left(\frac{80 \cdot 0,04 \cdot 120}{6} \right)$$

$$x_{opt} = 25 \cdot \ln \left(\frac{384}{6} \right)$$

$$x_{opt} = 25 \cdot \ln(64)$$

$$x_{opt} = 25 \cdot 4,158 \approx 104 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de } P_2O_5$$

Interpretação

A dose de 104 kg ha^{-1} , conforme ponto ilustrado na Figura 22, é o limite exato onde o último quilo de adubo aplicado se paga com a soja extra produzida. Se o produtor tentasse buscar a produtividade máxima absoluta (próxima a 80 sacas) adicionando, por exemplo, 150 kg ha^{-1} de P_2O_5 , a fórmula obtida prova (veja a curva da produtividade no gráfico da Figura 22) que o custo do fertilizante excedente seria muito maior que a receita gerada pelos poucos grãos extras colhidos.

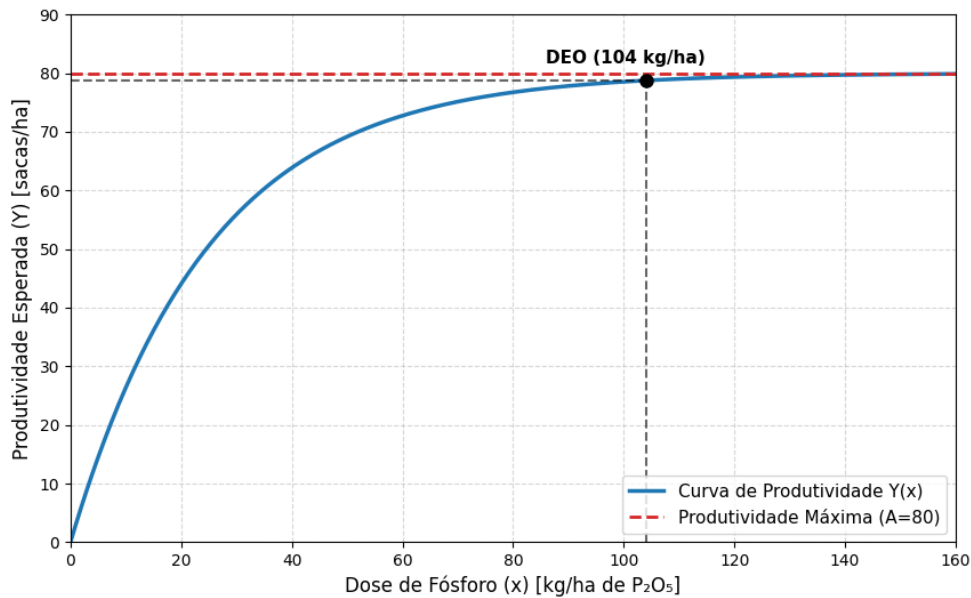


Figura 22. Curva de Resposta de Mitscherlich e Dose Econômica Ótima (DEO).

Por isso, a interpretação da análise de solo vai além de identificar deficiências químicas; trata-se também de utilizar a matemática para otimizar os recursos financeiros da lavoura, garantindo a eficiência de cada real investido no perfil do solo.

BALANÇO DE MASSAS E TAXAS DE EXPORTAÇÃO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

No Capítulo 10 discorreremos sobre a perda “invisível” de fertilidade causada pela erosão hídrica. Como o sedimento arrastado pela enxurrada é “enriquecido”, isto é, formado pelas partículas mais finas de argila e matéria orgânica, cada tonelada de solo perdida leva consigo a “despesa” (CTC) e os nutrientes recém-aplicados. Para garantir a sustentabilidade do sistema ao longo das safras e otimizar os custos, a fertilidade do solo deve ser tratada sob a ótica da conservação de massa, equacionando rigorosamente o que entra e o que sai da lavoura.

A matemática do balanço de massas trata o solo como um sistema termodinâmico aberto. A variação do estoque de um nutriente no perfil do solo (ΔE) é determinada pela diferença algébrica entre o somatório das entradas (Inputs) e o somatório das saídas (Outputs):

$$\Delta E = \sum \text{Entradas} - \sum \text{Saídas} = (F + M) - (\text{Exp} + Lx + Er)$$

Desmembrando os componentes agronômicos dessa equação, temos:

Entradas (*Inputs*):

- F : Adubação via fertilizantes (químicos ou orgânicos) e corretivos.
- M : Mineralização da matéria orgânica e liberação de nutrientes pela palhada.

Saídas (Outputs):

- *Exp*: Exportação de nutrientes removidos da área pelos grãos colhidos.
- *Lx*: Lixiviação (arraste de nutrientes para fora do alcance das raízes).
- *Er*: Perdas por erosão hídrica e eólica.

A meta do manejo de manutenção e conservação (abordado no Passo 5 do guia prático do Capítulo 11) é garantir que $\Delta E \geq 0$. Se o resultado for cronicamente negativo, a lavoura está passando por um processo de exaustão nutricional, operando como uma “mineração” do solo.

Como vimos no Capítulo 9, o fator de lixiviação (*Lx*) assume grande peso na equação de solos arenosos, exigindo o parcelamento da adubação para que a balança não se torne negativa. Já no Capítulo 10 observamos que, sob preparo convencional, o fator erosivo (*Er*) dispara.

Exemplo de aplicação prática

Para ilustrar, vamos modelar o balanço de potássio (K) em uma lavoura de soja de alta tecnologia. Sabemos, pela literatura agronômica, que a cultura da soja possui uma alta taxa de exportação de potássio: cada tonelada de grão colhida remove aproximadamente 20 kg de K_2O da área. Suponha uma safra com produtividade de 70 sacas ha^{-1} (4.200 kg ha^{-1} ou 4,2 t ha^{-1}).

Cálculo da Exportação (*Exp*):

$$Exp = 4,2 \text{ t } ha^{-1} \times 20 \text{ kg t}^{-1} = 84 \text{ kg } ha^{-1} \text{ de } K_2O$$

Supomos que o produtor, baseado na análise de solo, tenha aplicado 100 kg ha^{-1} de K_2O via fertilizante ($F = 100$). A mineralização de longo prazo da palhada e as perdas normais por lixiviação profunda neste Latossolo argiloso estabilizaram-se em $M = 5 \text{ kg } ha^{-1}$ e $Lx = 10 \text{ kg } ha^{-1}$, respectivamente.

Vamos avaliar o balanço de massas, de acordo com o equacionamento anterior, sob dois cenários de manejo distintos descritos no Capítulo 10.

Cenário A: sistema de plantio direto verdadeiro. O solo está protegido contra o impacto da gota de chuva por uma palhada permanente. A erosão é mínima (1,5 t ha^{-1}/ano), conforme Figura 19), resultando em uma perda de potássio por escoamento superficial de apenas $Er = 2 \text{ kg } ha^{-1}$.

$$\begin{aligned}\Delta E &= (100 + 5) - (84 + 10 + 2) \\ \Delta E &= 105 - 96 = +9 \text{ kg } ha^{-1} \text{ de } K_2O\end{aligned}$$

Portanto, o resultado é um Balanço positivo. A adubação cobriu as exportações da colheita de 70 sacas e ainda gerou um pequeno superávit que eleva gradativamente a fertilidade do sistema.

Cenário B: preparo convencional (solo descoberto). Sem a proteção da palhada, ocorre o selamento superficial e a consequente enxurrada. A erosão laminar sobe para patamares críticos (ex: $12 \text{ kg ha}^{-1}/\text{ano}$), arrastando a argila rica em potássio recém-aplicado. A perda de K no sedimento enriquecido dispara para $Er = 30 \text{ kg ha}^{-1}$.

$$\Delta E = (100 + 5) - (84 + 10 + 30)$$

$$\Delta E = 105 - 124 = -19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de } K_2O$$

Resultando em um déficit nutricional. Embora o produtor tenha aplicado mais adubo (100 kg) do que a soja extraiu no grão (84 kg), a perda erosiva escoou o investimento morro abaixo. O solo está empobrecendo.

Analisando ambos os cenários, concluímos, a partir do modelo matemático, que o balanço de massas consolida a tese central do Capítulo 10, a qual mostra que terraço isolado e adubação pesada não sustentam o sistema se a superfície estiver desprotegida.

Pelas razões expostas, conservar a estrutura e proteger o solo com palhada não é apenas uma prática ambiental, mas uma abordagem, mostrada matematicamente, para garantir que a adubação (Entrada) vire produtividade (Saída) em vez de prejuízo (Erosão).

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. Uma área agrícola foi avaliada para o cultivo de milho safrinha. A função de resposta à adubação nitrogenada segue o modelo de Mitscherlich, com os seguintes parâmetros calibrados para a região: produtividade máxima $A = 120 \text{ sacas ha}^{-1}$ e coeficiente de eficiência $c = 0,03$. Sabendo que o preço da saca de milho (P_y) é R\$ 60,00 e o custo do quilograma de nitrogênio aplicado (P_x) é R\$ 5,00, calcule a Dose Econômica Ótima (DEO) de nitrogênio a ser aplicada.
2. Considerando os mesmos dados do exercício anterior, suponha que uma crise logística internacional faça o preço do fertilizante nitrogenado (P_x) dobrar, passando para R\$ 10,00 o quilograma. Mantendo o preço do milho inalterado, recalcule a DEO. O que esse resultado demonstra matematicamente sobre a tomada de decisão agrônômica em anos de insumos caros?
3. Explique, sob a ótica do cálculo diferencial e do custo marginal, por que um produtor rural que tenta atingir a produtividade biológica máxima absoluta ($Y = A$) adicionando fertilizantes terá, obrigatoriamente, prejuízo econômico nas últimas unidades aplicadas.
4. Uma lavoura de soja produziu 80 sacas ha^{-1} (o equivalente a $4,8 \text{ t ha}^{-1}$). A taxa de exportação de potássio (K_2O) pelos grãos de soja é de 20 kg t^{-1} . O produtor realizou uma adubação (F) de 80 kg ha^{-1} de K_2O . Considerando que a mineralização da palhada foi nula ($M = 0$), as perdas por lixiviação profunda em solo arenoso foram estimadas em $Lx = 15 \text{ kg ha}^{-1}$ e as perdas por erosão em $Er = 5 \text{ kg ha}^{-1}$, calcule o balanço de massas (ΔE) do potássio neste talhão. O solo está enriquecendo ou empobrecendo neste nutriente?
5. A erosão é um dreno invisível de fertilidade. Considere uma lavoura de algodão que exige que o balanço de fósforo fique perfeitamente zerado ($\Delta E = 0$) para manter a estabilidade do solo. Em um Sistema de Plantio Direto (SPD) consolidado, as perdas de fósforo por erosão são de apenas $Er = 2 \text{ kg ha}^{-1}$. Se a mesma área fosse manejada com preparo convencional (solo descoberto), a perda erosiva dispararia para $Er = 35 \text{ kg ha}^{-1}$. Assumindo que exportação (Exp) e lixiviação (Lx) sejam idênticas nos dois casos, quantos quilogramas a mais de adubo fosfatado (F) o produtor do sistema convencional precisaria comprar e aplicar por hectare apenas para “empatar” com o nível de fertilidade mantido pelo Plantio Direto?
6. Em um Latossolo de textura argilosa, a lixiviação de fósforo (P) é praticamente nula ($Lx = 0$) devido à forte fixação pelas partículas do solo. Um agricultor projeta colher 150 sacas de milho por hectare (9 t ha^{-1}), sabendo que o milho exporta 15 kg de P_2O_5 por tonelada de grão colhido. Para construir a fertilidade do perfil, ele aplica 160 kg ha^{-1} de adubo fosfatado ($F = 160$). Com $M = 0$ e perdas por erosão de $Er = 4 \text{ kg ha}^{-1}$, demonstre o cálculo do balanço de massas e interprete se a estratégia de “adubação corretiva de construção” foi bem-sucedida nesta safra.

Gabarito comentado

CAPÍTULO 1

1. Clima quente e chuvoso acelera o intemperismo e a lixiviação: ao longo de muito tempo (solos antigos), as chuvas lavam as bases (Ca, Mg, K), restando minerais resistentes (quartzo, caulinita, óxidos) e acidez. Fatores envolvidos: clima + tempo, modulados por material de origem e relevo.
2. O horizonte A é superficial, escurecido pela matéria orgânica, concentra fertilidade, biologia e raízes — é a camada amostrada e manejada. O B é subsuperficial, expressa os processos de formação (acúmulo de argila/óxidos) e define a classificação; sua qualidade condiciona o aprofundamento radicular.
3. O espaço poroso é ocupado por água e ar, em proporções que variam com a umidade. As raízes precisam simultaneamente de água (transporte de nutrientes) e de oxigênio (respiração); excesso de um exclui o outro — daí a importância do equilíbrio ($\approx 25\%/25\%$).
4. As raízes absorvem íons dissolvidos na água do solo, não partículas sólidas. Consequência: um nutriente só “existe” para a planta se estiver (ou passar) na solução — por isso solubilidade, pH, umidade e CTC controlam a eficiência da adubação.

CAPÍTULO 2

1. Textura = proporção de areia, silte e argila (praticamente imutável). Estrutura = arranjo dessas partículas em agregados (fortemente modificável pelo manejo — para melhor ou pior).
2. Arenoso: drena rápido, aera bem, retém pouca água e poucos nutrientes (CTC baixa). Argiloso: retém mais água e nutrientes (CTC alta), drenagem mais lenta, aeração menor e mais sensível à compactação.
3. $550 \text{ g/kg} = 55\%$ de argila $\rightarrow$ solo argiloso. Implicações (duas entre): risco de compactação/janela de umidade para operações; maior fixação de P; maiores doses de calcário e gesso; boa retenção de água.
4. AD = água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha, efetivamente utilizável. O solo arenoso armazena pouca AD: em 15 dias sem chuva o perfil se esgota e a planta entra em déficit; o argiloso, com reserva maior, atravessa melhor o veranico.
5. Em solos tropicais muito intemperizados, a MOS é o principal “cimento” dos agregados (junto à atividade biológica que ela sustenta) e grande fonte de cargas; sem ela a estrutura colapsa, encrosta e erode.

CAPÍTULO 3

1. $SB = 2,0 + 0,8 + 0,3 = 3,1 \text{ cmolc/dm}^3$; $T = 3,1 + 4,9 = 8,0 \text{ cmolc/dm}^3$; $V\% = 3,1/8,0 \times 100 = 38,75\% \rightarrow V < 50\%$: solo distrófico.
2. Abaixo de $\text{pH} \sim 5,5$ o Al^{3+} solubiliza-se e intoxica o ápice radicular: as raízes engrossam, atrofiam e param de crescer, restringindo o acesso a água e nutrientes. Como grande parte dos solos brasileiros é ácida, o Al é a limitação química mais generalizada.
3. A CTC vem das cargas da argila e da MOS. No solo arenoso há pouquíssima argila, logo quase toda a CTC vem da MOS — cada ponto percentual de MOS “vale mais”. No argiloso, a argila já garante parte substancial das cargas.
4. $m\% = 45\%$ significa que quase metade do complexo de troca efetivo está ocupada por Al tóxico — limitação severa. Prática: calagem (neutraliza o Al na camada incorporada), complementada por gessagem se o problema se estender à subsuperfície.

5. Nessa faixa: máxima disponibilidade média dos nutrientes (P em especial), Al praticamente insolúvel, micronutrientes ainda disponíveis e boa atividade biológica (nodulação da soja).

CAPÍTULO 4

1. A produtividade é limitada pelo fator em menor disponibilidade relativa à necessidade da planta. No barril, cada tábua é um fator; a água (produtividade) só sobe até a tábua mais curta (fator limitante).
2. Errada: o fator limitante é o K. O N adicional não compensa (a “tábua” do K continua curta), eleva custo, pode desequilibrar a nutrição e gerar perdas ambientais. A dose extra de N seria dinheiro jogado fora.
3. Exemplos: camada compactada, déficit hídrico, subsolo álico. A compactada se diagnostica com trincheira, avaliação visual das raízes, penetrômetro e densidade do solo — e não aparece na análise química de 0–20 cm.
4. Mitscherlich mostra retornos decrescentes: as primeiras unidades do insumo dão as maiores respostas. Isso fundamenta o conceito de dose econômica ótima — corrige-se o fator limitante até o ponto em que o ganho paga o custo, não até o máximo biológico.

CAPÍTULO 5

1. Três entre: neutralização do Al tóxico; fornecimento de Ca e Mg; maior disponibilidade de P e eficiência dos fertilizantes; estímulo à atividade biológica e à fixação de N; melhor desenvolvimento radicular na camada corrigida.
2. $NC = (60 - 25) \times 9,0 \div 100 = 3,15 \text{ t/ha}$ (PRNT 100). Corrigindo: $3,15 \div 0,75 = 4,2 \text{ t/ha}$.
3. PN mede o potencial químico de neutralização; RE mede a velocidade (finura); $PRNT = PN \times RE/100$ integra ambos. Dois calcários de mesmo PN podem diferir na moagem: o grosso (RE baixa) reage pouco no horizonte de tempo agrícola.
4. O carbonato é pouco solúvel e é consumido onde reage; não desce no perfil. Consequência: a subsuperfície permanece ácida/pobre em Ca, confinando as raízes — problema que motiva a gessagem.
5. Quando o solo é pobre em Mg (situação típica do Cerrado): o dolomítico corrige a acidez e ainda repõe Mg, evitando desequilíbrio Ca/Mg induzido por calcários calcíticos.
6. Supercalagem = calagem excessiva, elevando demais o pH: induz deficiências de micronutrientes (Zn, Mn, Fe, B), pode degradar a estrutura e reduz a eficiência geral — corrigir é caro e lento.

CAPÍTULO 6

1. Porque seu ânion (SO_4^{2-}) não consome H^+ — diferentemente do carbonato. O gesso é um sal neutro: fornece Ca e S e age sobre o Al em profundidade, mas praticamente não muda o pH.
2. O gesso desce ao subsolo levando Ca e reduzindo a atividade do Al; as raízes passam a crescer em profundidade e acessam a água armazenada nas camadas de 40–80 cm, sustentando a planta nos períodos sem chuva.
3. Sim: $\text{Ca} < 0,5 \text{ cmolc/dm}^3$ e $m > 20\%$ na camada 20–40 cm — os dois critérios indicam. Dose: $NG = 50 \times 45 = 2.250 \text{ kg/ha}$ ($\approx 2,3 \text{ t/ha}$).
4. Lixiviação de Mg^{2+} e K^+ acompanhando o sulfato. Manejo: dose calculada (não “quanto mais melhor”), monitoramento das análises seguintes e uso de calcário dolomítico no programa de calagem.
5. Não são substituíveis: o calcário corrige pH e neutraliza Al na camada arável (o gesso não faz isso); o gesso melhora a subsuperfície (o calcário não chega lá). São práticas complementares, cada uma com critério e função próprios.

CAPÍTULO 7

1. Na umidade plástica o solo se deforma sob pressão sem se romper (como argila de modelar): a energia das rodas destrói macroporos e adensa camadas, inclusive profundas, onde a correção é difícil e cara.
2. Camada adensada formada logo abaixo da profundidade de trabalho de grades/arados usados repetidamente na mesma cota; a pressão do implemento compacta o fundo do corte a cada operação.
3. Sinais de campo e raízes deformadas (grátis); trincheira com avaliação visual da estrutura (VESS); penetrômetro (RP, referência ~2 MPa) e densidade do solo por anéis (comparação com valores críticos por textura).
4. Porque o solo escarificado fica sem estrutura estável: sem palhada, raízes e tráfego organizado, recompacta em 1–2 safras. A correção mecânica só se consolida com cobertura vegetal imediata, rotação e controle de tráfego.
5. Raízes de braquiárias, nabo e crotalárias penetram ou contornam camadas densas, criam bioporos contínuos e estáveis, adicionam MOS e “ancoram” a estrutura — funcionam como descompactação biológica contínua e barata.
6. A camada compactada é um fator limitante (tábua curta) físico: restringe oxigênio, água e acesso a nutrientes. Enquanto não for corrigida, investimentos em adubação não elevam a produtividade.

CAPÍTULO 8

1. Porque sua física é excelente (profundos, drenados, friáveis, relevo mecanizável) e sua pobreza química é corrigível com calagem, gessagem e adubação — correção que fica “residente” no sistema.
2. O gradiente textural: o B mais argiloso e menos permeável faz a água acumular e escoar sobre o contato A/B, cisalhando o horizonte superficial — erosão laminar e em sulcos.
3. Quartzarênicos: arenosos (>70% areia), CTC e retenção de água baixíssimas — desafio químico e hídrico. Nitossolos: muito argilosos, férteis quando eutróficos, estrutura forte — desafio é físico (compactação, janela de umidade).
4. Eutrófico: $V \geq 50\%$ (fértil). Distrófico: $V < 50\%$ (pobre em bases). Álico: alta saturação por alumínio (m elevado), condição severamente limitante.
5. Resposta esperada: a pesquisa (Embrapa e parceiros) diagnosticou as limitações (acidez, Al, Ca, P) e desenvolveu o pacote calagem + gessagem + adubação corretiva + cultivares adaptadas, convertendo solos “inférteis” do Cerrado no maior polo de grãos do país — exemplo histórico da aplicação da Lei do Mínimo.

CAPÍTULO 9

1. Porque a CTC baixa não segura os íons e a chuva os lixivia para fora do alcance das raízes; doses menores e repetidas sincronizam a oferta com a absorção da planta.
2. Com CTC baixa, pouca base já eleva muito o V% — dose alta causa supercalagem; mas, como a reserva é pequena e a lixiviação contínua, o efeito dura menos, exigindo reaplicações mais frequentes.
3. Arenoso: construir/proteger matéria orgânica (é a fonte de CTC, água e estrutura). Argiloso: proteger a estrutura física contra a compactação (a química é mais estável, a física é o ponto fraco).
4. Riscos: compactação severa (solo plástico), atolamento, danos à estrutura com efeito plurianual. Alternativas: esperar a friabilidade, priorizar talhões mais drenados, reduzir carga dos graneleiros, tráfego nos mesmos rastros, e planejar colheita conforme previsão.

5. A braquiária pastejada produz enorme volume de raízes e palhada, elevando a MOS (logo CTC, água disponível e agregação); o pastejo bem manejado ainda diversifica renda — é o caminho mais rápido para “construir” um solo arenoso produtivo.

CAPÍTULO 10

1. Porque a enxurrada carrega preferencialmente as frações mais finas e leves — argila e matéria orgânica —, que concentram a CTC e os nutrientes. Assim, cada tonelada erodida contém mais fertilidade que o solo remanescente: perde-se adubo, corretivo e capacidade de troca, e o custo real supera em muito o “volume de terra” perdido.
2. Porque remove uma lâmina fina e uniforme, sem deixar sulcos visíveis: o produtor não a percebe enquanto a produtividade cai ano a ano. Quando os sinais ficam evidentes (raízes expostas, manchas claras), grande parte da camada fértil já se foi.
3. A gota, ao atingir solo descoberto, desagrega os agregados (efeito splash) e forma crosta que sela os poros; a infiltração cai e a água escorre, iniciando o transporte. Como o processo começa na superfície nua, a cobertura (palhada/plantas) que absorve a energia da gota é a defesa mais eficaz — reduz as perdas em até 90% ou mais.
4. Vegetativas: palhada permanente, plantas de cobertura, rotação, faixas vegetadas. Edáficas: calagem/adubação adequadas, elevação da MOS, não queimar resíduos. Mecânicas: plantio em nível, terraceamento, barraginhas, locação correta de estradas. (Dois exemplos de cada bastam.)
5. Revolvimento mínimo, cobertura permanente e rotação de culturas. Sem palha e sem rotação, o sistema perde a proteção contra a gota, a produção de MOS e a quebra de ciclos de pragas/daninhas — acumulando compactação e problemas fitossanitários: é semeadura direta “de nome”, não o sistema.
6. Erosão: convencional expõe o solo (perdas altas); SPD mantém cobertura (perdas mínimas). MOS: convencional oxida e reduz; SPD acumula. Água: convencional infiltra menos e evapora mais; SPD infiltra e armazena mais, atenuando veranicos.

CAPÍTULO 11

1. Porque ~300 g analisados representam milhões de kg de solo: se a coleta não for representativa, o laudo descreve outro solo, e todo o cálculo posterior será errado — nenhum laboratório corrige amostra ruim. Regras (três entre): dividir em glebas homogêneas; 15–20 subamostras em zigue-zague por gleba; profundidades 0–20 e 20–40 cm; evitar pontos atípicos; equipamentos limpos; mesma época todos os anos.
2. $K = 117 \div 390 = 0,30 \text{ cmolc/dm}^3$ — teor médio, no limite superior da faixa (praticamente adequado).
3. $SB = 3,2 + 1,1 + 0,35 = 4,65$; $T = 4,65 + 3,0 = 7,65 \text{ cmolc/dm}^3$; $V\% = 4,65 \div 7,65 \times 100 = 60,8\%$. Como V já é $\geq 60\%$, pH está adequado (5,6 em CaCl_2) e $Al = 0$, **não é necessária calagem** — aplicar seria corrigir o que não limita. P e K também estão adequados para solo argiloso; M.O. boa.
4. Não: $Ca = 1,2 > 0,5 \text{ cmolc/dm}^3$ e $m = 5\% < 20\%$. Nenhum critério de gessagem foi atingido — a subsuperfície já é quimicamente hospitaleira, e o gesso não traria resposta (Lei do Mínimo).
5. $NC = (55 - 35) \times 11 \div 100 = 2,2 \text{ t/ha}$ (PRNT 100). Ajuste: $2,2 \div 0,90 = 2,4 \text{ t/ha}$.
6. O laudo é só o diagnóstico químico de 0–20 cm. Ele deve investigar as limitações que a análise não enxerga: física do solo (trincheira, avaliação visual, penetrômetro, densidade — compactação), água (distribuição de chuvas, armazenamento), subsuperfície (20–40 cm), erosão e fatores fitossanitários (nematóides, doenças de raiz).

CAPÍTULO 12

1. Aplicando os valores na fórmula da DEO:

$$x_{opt} = \frac{1}{0,03} \ln \left(\frac{120 \cdot 0,03 \cdot 60}{5} \right)$$

$$x_{opt} = 33,33 \cdot \ln \left(\frac{216}{5} \right)$$

$$x_{opt} = 33,33 \cdot \ln(43,2)$$

$$x_{opt} = 33,33 \cdot 3,765 \approx 125,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de Nitrogênio}$$

Resposta: A dose econômica ótima é de aproximadamente $125,5 \text{ kg ha}^{-1}$.

2. Recalculando com $P_x = 10$:

$$x_{opt} = \frac{1}{0,03} \ln \left(\frac{120 \cdot 0,03 \cdot 60}{10} \right)$$

$$x_{opt} = 33,33 \cdot \ln(21,6)$$

$$x_{opt} = 33,33 \cdot 3,072 \approx 102,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de Nitrogênio}$$

Resposta: A DEO cai para $102,4 \text{ kg ha}^{-1}$. Matematicamente, o aumento no denominador (custo marginal) reduz o argumento do logaritmo natural. Agronomicamente, isso prova que em anos de insumos caros, o produtor não deve buscar as mesmas produtividades de anos favoráveis; a dose deve ser reduzida para maximizar a rentabilidade financeira, respeitando a Lei de Mitscherlich.

3. A derivada da equação de produtividade, $\frac{dY}{dx}$, representa o ganho marginal. Como a curva de Mitscherlich é assintótica, à medida que a produtividade se aproxima do máximo biológico (A), a inclinação da curva $\left(\frac{dY}{dx}\right)$ tende a zero. Como o fertilizante tem um custo constante ($P_x > 0$), chegará um ponto antes do limite absoluto onde a receita gerada pelo incremento ínfimo de grãos $\left(\frac{dY}{dx} \cdot P_y\right)$ será menor que o preço do adubo adicionado (P_x). Ultrapassar esse ponto é trocar dinheiro por produtividade sem lucro real.

4. Cálculo da Exportação (Exp): $4,8 \text{ t ha}^{-1} \times 20 \text{ kg t}^{-1} = 96 \text{ kg ha}^{-1}$.

Aplicando a equação de balanço de massas:

$$\Delta E = (F + M) - (Exp + Lx + Er)$$

$$\Delta E = (80 + 0) - (96 + 15 + 5)$$

$$\Delta E = 80 - 116 = -36 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de } K_2O$$

Resposta: O balanço é negativo (-36 kg ha^{-1}). O solo está empobrecendo, pois o produtor aplicou menos potássio do que a cultura extraiu somado às perdas naturais do perfil.

5. O balanço exige que $\Delta E = 0$. Logo, as entradas devem igualar as saídas: $F = Exp + Lx + Er$. Como Exp e Lx são constantes nos dois cenários, a diferença de fertilizante necessário ($F_{conv} - F_{spd}$) será exatamente a diferença de perdas por erosão entre os sistemas.

$$\Delta F = Er_{conv} - Er_{spd}$$

$$\Delta F = 35 - 2 = 33 \text{ kg ha}^{-1}$$

Resposta: O produtor no sistema convencional precisará comprar e aplicar 33 kg ha^{-1} a mais de fósforo todos os anos apenas para repor a fertilidade levada pela erosão, encarecendo permanentemente seu custo de produção.

6. Cálculo da Exportação (Exp): $9 \text{ t ha}^{-1} \times 15 \text{ kg t}^{-1} = 135 \text{ kg ha}^{-1}$.

Aplicando a equação:

$$\Delta E = (160 + 0) - (135 + 0 + 4)$$

$$\Delta E = 160 - 139 = +21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de } P_2O_5$$

Resposta: O balanço resultou um valor positivo de 21 kg ha^{-1} . A estratégia foi bem-sucedida, caracterizando uma verdadeira adubação de construção. O produtor garantiu a nutrição da alta produtividade (150 sacas) e ainda deixou um saldo positivo no solo, aumentando a “despesa” nutricional para as próximas safras.

Glossário

Termo	Definição breve
Acidez potencial (H+Al)	H ⁺ e Al ³⁺ retidos no complexo de troca; parcela “escondida” da acidez, revelada na análise.
Água disponível (AD)	Água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha, utilizável pelas plantas.
Amostra composta	Mistura de 15–20 subamostras de uma gleba homogênea, enviada ao laboratório.
Álico	Solo com alta saturação por alumínio (m elevado); severamente limitante.
Calagem	Aplicação de calcário para corrigir acidez, neutralizar Al e fornecer Ca e Mg.
Capacidade de campo (CC)	Umidade retida pelo solo após drenagem do excesso de água.
CTC (T)	Capacidade de troca de cátions a pH 7: total de cargas que retêm cátions trocáveis (cmolc/dm ³).
Distrófico / Eutrófico	V < 50% (pobre) / V ≥ 50% (fértil).
Encrostamento	Selamento da superfície pela crosta formada pelo impacto das gotas em solo descoberto.
Erosão laminar / em sulcos / voçoroca	Remoção em lâmina uniforme / em canais visíveis / em valas profundas (estágio extremo).
Densidade do solo (Ds)	Massa de solo seco por volume (g/cm ³); sobe com a compactação.
Escarificação / Subsolação	Rompimento mecânico de camadas compactadas (até ~30 cm / abaixo de 30 cm).
Gessagem	Aplicação de gesso agrícola (CaSO ₄ ·2H ₂ O) para levar Ca e S e reduzir Al ativo na subsuperfície.

Termo	Definição breve
Horizonte	Camada do perfil do solo com características próprias (O, A, B, C, R).
Intemperismo	Conjunto de processos que decompõem rochas e minerais, originando o solo.
Laudo de análise de solo	Relatório do laboratório com os teores químicos (e, se pedida, a granulometria) da amostra.
Lixiviação	Arraste de íons em profundidade pela água de percolação.
Lei do Mínimo	A produtividade é limitada pelo fator em menor disponibilidade relativa (Liebig).
m% (saturação por Al)	$[Al \div (SB+Al)] \times 100$; proporção do complexo efetivo ocupada por Al tóxico.
Macro/microporos	Poros grandes (aeração/drenagem) e pequenos (retenção de água).
Matéria orgânica (MOS)	Fração orgânica do solo; fonte de cargas, nutrientes, água e estrutura.
Pé-de-grade	Camada compactada formada sob a profundidade de trabalho de grades/arados.
pH	Medida da acidez (atividade de H^+) da solução do solo.
Plantio direto	Sistema sem revolvimento, com palhada permanente e rotação de culturas.
PMP	Ponto de murcha permanente: umidade abaixo da qual a planta não extrai mais água.
PRNT	Poder Relativo de Neutralização Total do calcário ($= PN \times RE \div 100$).
Resistência à penetração (RP)	Força para penetrar o solo (penetrômetro); ~2 MPa já restringe raízes.
Saturação por bases (V%)	$(SB \div T) \times 100$; proporção da CTC ocupada por Ca, Mg e K.

Termo	Definição breve
Soma de bases (SB)	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ (+ \text{Na}^+)$ trocáveis.
Solução do solo	Água do solo com íons dissolvidos; meio de absorção das raízes.
Terraceamento	Obras em nível (camalhão + canal) que interceptam a enxurrada no declive.
Veranico	Período de estiagem dentro da estação chuvosa.

Referências e leituras recomendadas

As obras abaixo aprofundam os temas desta apostila e são as fontes clássicas de consulta na área:

- Brady, N. C.; Weil, R. R. (2013). Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.
- Havlin, J., Heiniger, R. (2020). Soil fertility management for better crop production. *Agronomy*, 10(9), 1349.
- Lepsch, I. F. (2011). 19 lições de pedologia. São Paulo: Oficina de Textos.
- Novais, R. F. et al. (2007). Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS.
- Raij, B. van et al. (1997). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo (Boletim 100). 2. ed. Campinas: IAC.
- Reichert, J. M., Reinert, D. J., Braidá, J. A. (2003). Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, v. 27.
- Sousa, D. M. G., Lobato, E. (2004). Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.

Índice Remissivo

A

amostragem, 10, 65, 66, 71, 72

C

camada compactada, 27, 28, 40, 41, 80, 81

Cerrado, 8, 13, 22, 32, 35, 36, 45, 48, 49, 67, 68,
70, 80, 81, 88

correção mecânica, 42, 44, 81

E

equação, 73, 74, 75, 76, 83, 84

F

fórmula, 32, 68, 74, 83

L

laboratório, 14, 65, 66, 67, 82, 85, 86

laudo, 19, 21, 65, 67, 68, 70, 71, 72, 82

M

modelo, 77, 78

P

palhada, 10, 24, 42, 43, 50, 57, 58, 59, 60, 68,
70, 71, 81, 82, 86

R

recarga do perfil, 40

roteiro, 65, 68, 69, 72

S

sedimento, 8, 56, 64

Sistema radicular, 40

solo ácido, 30

solo úmido, 17, 33, 40, 42, 44, 55

T

tóxico, 20, 21, 24, 28, 30, 35, 36, 48, 67, 79, 80,
86

V

veranico, 19, 35, 51, 53, 62, 79

Sobre os organizadores e autores



  **Renato Lustosa Sobrinho**

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Agronomia pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), é pesquisador associado à University of Antwerp (Bélgica) e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia Sustentabilidade na Agricultura da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS). Atua nas áreas de fisiologia vegetal, microbiologia agrícola, bioinsumos, mudanças climáticas, agricultura sustentável e inteligência artificial aplicada à agricultura. Desenvolve pesquisas sobre interação planta-microrganismo,

estresses ambientais, eficiência do uso de nutrientes, resiliência vegetal e aplicação de inteligência artificial, aprendizado de máquina e análise multivariada a dados agronômicos. Desde 2019, integra o grupo IMPRES (Integrated Molecular Plant Physiology Research) da University of Antwerp e mantém colaborações científicas nacionais e internacionais. É líder do Grupo de Pesquisa "Inteligência Artificial no Cerrado", certificado no Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq, coordenando pesquisas voltadas à integração entre inteligência artificial, ciência de dados, agricultura digital, bioinsumos e sustentabilidade. Sua atuação busca desenvolver soluções tecnológicas e ferramentas de apoio à tomada de decisão, contribuindo para a formação de recursos humanos, inovação, transferência de conhecimento e aumento da resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas.



  **Bruno Rodrigues de Oliveira**

Graduado em Matemática pela UEMS/Cassilândia (2008). Mestrado (2015) e Doutorado (2020) em Engenharia Elétrica pela UNESP/Ilha Solteira. Pós-doutorado pela UFMS/Chapadão do Sul na área de Inteligência Artificial aplicada na Engenharia Florestar/Agrônômica. É editor da Pantanal Editora e da Revista Trends in Agricultural and Environmental Sciences e Analista no Tribunal de Justiça de Mato Grosso do Sul. Tem experiência nos temas: Matemática, Processamento de Sinais via Transformada Wavelet, Análise Hierárquica de

Processos, Teoria de Aprendizagem de Máquina e Inteligência Artificial, Lógica Fuzzy, com ênfase em aplicações nas áreas de Engenharia Biomédica, Ciências Agrárias e Ambientais e Organizações Públicas. Contato: bruno@editorapantanal.com.br



 **Bruno Ascoli**

Eng. Agrônomo com conhecimento holístico, experiências nos setores de pesquisa, comercial e ambiental. Dedico minha trajetória à interseção entre a pesquisa científica e o empreendedorismo no agronegócio de base tecnológica. Minha atuação concentra-se em um segmento ainda imaturo e de altíssimo potencial no Brasil: o cultivo legal de *Cannabis sativa* L. para fins medicinais e industriais. Como pesquisador, participo do Programa de Pós Graduação em Agronomia (PGAC) na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS),

unidade de Cassilândia, com linha de pesquisa voltada ao incremento de metabólitos secundários e à densidade de tricomas em espécies da família Cannabaceae. Meu interesse acadêmico percorre a fisiologia vegetal, a fitoquímica, o metabolismo secundário e o emprego de elicitores e precursores como ferramentas para potencializar a produção de compostos de interesse. Sócio-fundador da Connabis

AgTech, especializada em implementação de projetos, laudos e consultoria técnica para o cultivo legal de Cannabis medicinal e industrial. Estruturo soluções que integram o rigor agrônomo à conformidade regulatória, apoiando projetos em sua concepção e durante a operação, oferecendo suporte técnico-científico de excelência a um setor que demanda, simultaneamente, precisão agrônoma e domínio normativo.



Carlos Eduardo da Silva Oliveira

Professor Doutor junto ao curso de Engenharia Agrônoma da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Cassilândia. Professor orientador do Programa de Pós-Graduação - stricto sensu - em Agronomia, área de concentração: Sustentabilidade na Agricultura, em Cassilândia, MS. Coordenador do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Bolsão Sul-Mato-Grossense (CEDESU) da Unidade Universitária de Cassilândia (UEMS). Editor Sênior do periódico Journal of Cotton Research (BMC-

Springer nature). Engenheiro Agrônomo - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, UEMS/UUC- 2018. Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, UEMS/UUC-2020, Área de concentração Sustentabilidade na Agricultura. Doutor em Agronomia - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP/FEIS-2023, Pós-Doutorado em Agronomia - UNESP/FEIS-2025 - Área de concentração Sistemas de Produção. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Fitotecnia, Nutrição de plantas, Horticultura, Fisiologia vegetal, Fisiologia do estresse, Culturas de Oleaginosas e Leguminosa, Culturas de Cereais, Algodão e Melhoramento Vegetal. Atuando principalmente nos seguintes temas: nutrição de plantas; cultivos hidropônicos; estratégias de amenizar estresses abióticos em plantas; bactérias promotoras de crescimento e nutrientes para amenizar efeito de estresses abióticos e/ou melhorar a eficiência no uso de fertilizantes; variabilidade genética de plantas; condicionamento osmótico de sementes; germinação de sementes. Experiência no cultivo de Algodão, soja, feijão, milho, arroz, trigo, sorgo, amendoim, mamona, citros, tomate, pimentão, pepino, melão, melancia, abóboras, alface, rúcula, couve, cebolinha e mandioca em condições normais e de estresse salino e/ou hídrico; como em sistema de cultivo irrigado e sequeiro.



Edilson Costa

Possui Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas (1998), Mestrado em Engenharia Agrícola na área de Construções Rurais e Ambiente pela Universidade Estadual de Campinas (2001) e Doutorado em Engenharia Agrícola na área de Construções Rurais e Ambiente pela Universidade Estadual de Campinas (2004). É professor da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) desde fevereiro de 2005. Atualmente é Professor Titular (Nível VI) da UEMS, na Unidade Universitária de Cassilândia (Curso de Graduação e Pós-Graduação em Agronomia).

Tem experiência na área de cultivo protegido, com ênfase em Ambiente Vegetal, atuando principalmente nos seguintes temas: casas de vegetação, controle climático, hidroponia, substratos e produção de mudas de hortaliças, florestais e frutíferas. Líder do Grupo de Pesquisa do CNPq intitulado de Ambientes Protegidos para a Produção Vegetal, criado no ano de 2010. É bolsista produtividade em Pesquisa do CNPq desde 2013. Foi Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Sustentabilidade na Agricultura (PGAC) em 2013 e 2014 e atual Coordenador do PGAC de 2023 a até presente data. É consultor ad-hoc da FINEP, CAPES, CNPq, FUNDECT. É revisor de vários periódicos nacionais e internacionais.



  **Edson de Lima Bobadilha**

Possui graduação em Produção Multimídia pela Universidade para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal (2010), especialização em Gestão Pública pela Ideal Grupo (2025), especialização em Gestão Ambiental pelo Instituto Facuminas EAD Ltda. (2025) e especialização em Direito Público pela Faculdade Legale (2025). Atualmente é Secretário de Desenvolvimento Econômico da Prefeitura Municipal de Cassilândia. É mestrando no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), na área de concentração em Sustentabilidade no Agronegócio, desenvolvendo pesquisa relacionada à modelagem espaço-temporal, aprendizado de máquina, geotecnologias e suporte à formulação de políticas públicas para recuperação de pastagens tropicais. Tem experiência na área de Planejamento Urbano e Regional, com ênfase em Serviços Urbanos e Regionais, gestão pública, desenvolvimento econômico e gestão ambiental.



  **Eduardo Paulino da Costa Silva**

Engenheiro Agrônomo formado pela Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) - Unidade de Cassilândia/MS, com vivência prática adquirida durante estágio na empresa Desafios Agro na área de fitopatologia, onde atuei no diagnóstico e manejo de doenças em grandes culturas, como soja, milho e algodão. Experiência em conduzir ensaios à campo. Atualmente é mestrando na área de Sustentabilidade na Agricultura pelo programa de pós-graduação (PGAC-UEMS), direcionando suas pesquisas na aplicação de bioinsumos no controle de míldio e oídio em espécies da família Cannabaceae.



  **Elen Cristina Fernandes Rosa**

Administradora, mestranda no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, na área de concentração Sustentabilidade na Agricultura (PGAC), pela Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Cassilândia. Atua como Diretora de Gestão e Orçamento na Prefeitura Municipal de Cassilândia-MS, com experiência em gestão pública, planejamento governamental e orçamento público, especialmente na elaboração, acompanhamento e execução dos instrumentos de planejamento e orçamento. Possui formação técnica em Segurança do Trabalho e interesse nas áreas de sustentabilidade, gestão pública, planejamento estratégico e desenvolvimento sustentável.



  **Gustavo Haralampidou da Costa Vieira**

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (1995), mestrado em Ecologia e Conservação pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (1999) e doutorado em Entomologia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Esalq/USP (2005). Atualmente é Professor Titular da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul e orientador do Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Agronomia, área de concentração: Sustentabilidade na Agricultura, em Cassilândia, MS. Possui experiência em Ecologia de Apidae, análise físico-química de mel, manejo de abelhas Apidae e Meliponinae. Na área de licenciatura ministrou curso sobre formação de professores (parceria

UEMS/Prefeitura Municipal de Cassilândia), desenvolveu por quatro anos um projeto nas escolas públicas relacionado a metodologia das aulas práticas de ciências, atuou na formação docente dos alunos do curso de ciências habilitação matemática, sendo responsável pela disciplina de prática de ensino. Desde 2008 ocupa o cargo de diretor do campus de Cassilândia.



  **Jorge González Aguilera**

Engenheiro Agrônomo, graduado em Agronomia (1996) na Universidad de Granma (UG), Bayamo, Cuba. Especialista em Biotecnologia (2002) pela Universidad de Oriente (UO), Santiago de Cuba, Cuba. Mestre (2007) em Fitotecnia na Universidade Federal do Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil. Doutor (2011) em Genética e Melhoramento de Plantas na Universidade Federal do Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil. Pós - Doutorado (2016) em Genética e Melhoramento de Plantas na EMBRAPA Trigo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Professor Visitante (2018-2022) na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) no campus Chapadão do Sul (CPCS), MS, Brasil. Professor substituto (2023-Atual) na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Cassilândia, MS, Brasil. Atualmente, possui 182 artigos publicados/aceitos em revistas nacionais e internacionais, 29 resumos simples/expandidos, 69 organizações de e-books, 53 capítulos de e-books. É editor da Pantanal Editora, e da Revista Trends in Agricultural and Environmental Sciences, e revisor de 19 revistas nacionais e internacionais. Contato: j51173@yahoo.com



  **Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho**

Possui atuação internacional consolidada, com experiência acadêmica, participação em redes de pesquisa e colaborações científicas com instituições de diferentes países. Em 2017, realizou estágio de curta duração como Professor Visitante no Plant Nutrition Group da ETH Zürich, na Suíça, fortalecendo sua inserção internacional na área de nutrição de plantas. Integra o projeto internacional SMARTHARVEST, uma rede de pesquisa financiada pelo governo da Dinamarca e formada por parceiros da Índia, Dinamarca, Estados Unidos, Japão e Brasil.

Também participa, como representante da UNESP, da Global Bioeconomy Alliance – Sustainable Food Production, contribuindo para discussões e ações relacionadas à produção sustentável de alimentos e bioeconomia. Mantém colaborações científicas que resultaram em publicações conjuntas com pesquisadores da University of Minnesota e The University of Texas Rio Grande Valley, nos Estados Unidos; University of Copenhagen, na Dinamarca; University of Agriculture Peshawar, no Paquistão; Urmia University, no Irã; Università degli Studi di Sassari, na Itália; University of Antwerp, na Bélgica; e California State University, nos Estados Unidos.



  **Tiago Zoz**

Engenheiro Agrônomo e Doutor em Agronomia - Agricultura (Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA/UNESP) / Texas Tech University (TTU), 2015. Atua na área de tecnologia e inovação na agricultura e tem experiência na área de melhoramento vegetal relacionado à estresses abióticos e nutrição mineral de plantas, atuando principalmente nas culturas de soja, milho e amendoim.



  **Vitor Augusto Neves**

Engenheiro Agrônomo, especialista em Pecuária Leiteira e em Georreferenciamento de Imóveis Rurais, mestrando em Agronomia, na área de concentração Sustentabilidade na Agricultura (PGAC), pela Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Cassilândia (UUC), com início em 2026. Possui experiência em Assistência Técnica e Gerencial (ATeG), desenvolvimento rural, pecuária leiteira, planejamento produtivo, manejo de pastagens, fertilidade do solo, geoprocessamento e tecnologias aplicadas ao agronegócio. Atua no desenvolvimento de soluções técnicas e gerenciais voltadas à eficiência produtiva, gestão e sustentabilidade das atividades agropecuárias.

Este e-book foi concebido para nivelamento de estudantes de Pós-Graduação e para auxiliar a comunidade atendida pelo Projeto de Extensão “Território Vivo” do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGAC) da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) da Unidade Universitária de Cassilândia.



9786585756907

Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp)
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br