BERNARDO VAN RAIJ

AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

ISRIC LIBRARY
FERT 59
Wageningen
The Netherlands

la Potassa & Fosfato (EUA)
nternacional da Potassa (SUIÇA)

Scanned from original by ISRIC – World Soil Information, as ICSU World Data Centre for Soils. The purpose is to make a safe depository for endangered documents and to make the accrued information available for consultation, following Fair Use Guidelines. Every effort is taken to respect Copyright of the materials within the archives where the identification of the Copyright holder is clear and, where feasible, to contact the originators. For questions please contact soil.isric@wur.nl indicating the item reference number concerned.

AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

5852

Editado por:
T. Yamada, diretor
Institutos da Potassa (EUA - Suiça)
Rua Alfredo Guedes n.º 1949 - sala 701
Caixa Postal 400 tel. (0194) 33-3254
13.400 - Piracicaba - SP, Brasil

BERNARDO VAN RAIJ
Instituto Agronômico do Estado de São Paulo
Campinas — S.P.

AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

2ª EDIÇÃO

Instituto da Potassa & Fosfato (EUA)
Instituto Internacional da Potassa (SUIÇA)

PIRACICABA, SP
DEZEMBRO, 1983

COMPOSIÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:
Editora Franciscana (LAFRAME) – Piracicaba (SP)

R149a

Raij, Bernardo van
Avaliação da fertilidade do solo / Bernardo van Raij, 1939 - Piracicaba : Instituto da Potassa & Fosfato : Instituto Internacional da Potassa, 1981.
142p. : il.
Bibliografia.
1. Solos - Fertilidade I. Instituto da Potassa & Fosfato. II. Instituto Internacional da Potassa III. Título

19. CDD - 631.422
CDU - 631.452

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios de reprodução, sem autorização do editor.

IMPRESSO NO BRASIL
PRINTED IN BRAZIL

APRESENTAÇÃO

É com prazer que passamos às mãos de nossos leitores o livro "Avaliação da Fertilidade do Solo", de autoria do Dr. Bernardo van Raij, da Seção de Fertilidade do Solo, Instituto Agronômico, Campinas - SP. Dado ao profundo conhecimento do autor, há quase duas décadas dedicando-se inteiramente ao estudo da Fertilidade do Solo, estamos certos que este livro será de grande valia aos leitores interessados nesse campo de atividade.

Aproveitando a oportunidade, queremos agradecer ao Dr. Bernardo van Raij, pela honra concedida aos Institutos da Potassa (EUA - SUIÇA), em poder publicar este tão didático e instrutivo livro.

Num país como o nosso, com abundância de solos ácidos, onde o consumo de calcário agrícola é muito inferior ao de fertilizantes, sentimos de imediato, que temos ainda, bastante a fazer pela fertilidade do solo brasileiro. E, apenas com a ação conjunta de pesquisadores, professores e extensionistas, além das competentes medidas governamentais, esta situação poderá ser alterada.

Sentimos pois, honrados e felizes em poder levar aos leitores, através desta obra, os conhecimentos acumulados e amadurecidos pelo autor, na certeza de que eles estarão concorrendo para elevar a produtividade da agricultura brasileira.

Piracicaba, setembro de 1981

T. Yamada, diretor
Institutos da Potassa
(EUA - SUIÇA)

«Deves admitir que quando se coloca esterco no terreno é para devolver ao solo algo que foi retirado... Quando uma planta é queimada ela é convertida em uma cinza salgada, chamada de álcali por farmacêuticos e filósofos... Qualquer espécie de planta, sem exceção, contém algum tipo de sal. Não vistes que certos trabalhadores, quando semeam um campo com trigo pelo segundo ano em sucessão, queimam a palha de trigo não utilizada que havia sido retirada? Nas cinzas é encontrado o sal que a palha retirou do solo; se isto é devolvido, o solo é melhorado. Queimado no chão serve de adubo, porque devolve ao solo aquelas substâncias que haviam sido retiradas».

Pallisy, 1563

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO 1

2. CONSTITUIÇÃO DO SOLO 3
   2.1. Conceito do solo 3
   2.2. Granulometria 4
   2.3. Porosidade e agregação 6
   2.4. Retenção de água 8
   2.5. Aeração 9
   2.6. Minerais do solo 10
   2.7. A matéria orgânica 14
   2.8. Constituição do solo e produtividade 15

3. MECANISMOS DE INTERAÇÕES ENTRE SOLOS E NUTRIENTES 17
   3.1. A solução do solo 17
   3.2. Retenção e troca de catíons e aníons 19
   3.3. Origem da troca de íons em solos 21
   3.4. Equilíbrio de catíons trocáveis e em solução 25
   3.5. Adsorção de fosfatos 27
   3.6. Processos biológicos envolvendo nitrogênio 30

4. CONCEITOS 33
   4.1. Absorção e disponibilidade de nutrientes 33
   4.2. Curvas de resposta 35
   4.3. A lei do mínimo 37
   4.4. A lei dos incrementos decrescentes 39
   4.5. O conceito da porcentagem de suficiência 41
   4.6. A mobilidade dos nutrientes 42
   4.7. Interações dos fatores de produção 44
   4.8. Doses mais econômicas de fertilizates 46

5. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO E ESTABELECIMENTO DE NÍVEIS DE ADUBAÇÃO 49
   5.1. Ensaios de adubação com plantas 49
   5.2. Análise estatística de resultados experimentais 53
   5.3. Análise de solo 58
      5.3.1. Etapas de um programa de análise de solo 59
      5.3.2. A importância da amostragem 60
      5.3.3. Seleção de métodos de análise 62

5.3.4. Correlações entre respostas de culturas e teores em solos 63
5.3.5. Estabelecimento de classes de teores de nutrientes no solo 66
5.3.6. Níveis de adubação 69
5.3.7. Adubação corretiva 69
5.4. Análise de plantas 70
5.5. Uso alternativo da análise de solo ou da diagnose foliar 72

6. ACIDEZ E CALAGEM 75
6.1. Conceitos de acidez 75
6.2. Origem da acidez dos solos 77
6.3. Neutralização de ácidos e solos 78
6.4. Os catíons trocáveis e a capacidade de troca 80
6.5. Relações entre catíons trocáveis e pH 83
6.6. Métodos de laboratório para determinação da necessidade de calagem 85
6.6.1. Conceituação da necessidade de calagem 85
6.6.2. Incubação com carbonato de cálcio 87
6.6.3. Elevação da saturação em bases 88
6.6.4. Neutralização de alumínio e elevação de cálcio e magnésio 90
6.6.5. Uso do tampão SMP 91
6.6.6. Métodos semi-empíricos 93
6.7. Escolha do método 93

7. FÓSFORO 95
7.1. Formas no solo 95
7.2. Disponibilidade 97
7.3. Métodos de determinação 100
7.4. Correlação e calibração 102
7.4.1. Adubação de manutenção 102
7.4.2. Adubação corretiva 104
7.5. Estabelecimento de níveis de adubação 106

8. POTÁSSIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO 109
8.1. Formas no solo 109
8.2. Disponibilidade 110
8.3. Métodos de determinação 111
8.4. Correlações e calibração para potássio trocável 111
8.5. Teores mínimos de magésio e cálcio 114
8.6. Saturação de catíons 114
8.7. Respostas de culturas a potássio 116

9. NITROGÊNIO 119
9.1. Formas no solo 119
9.2. Disponibilidade 120
9.3. Métodos de determinação 121
9.4. Níveis de adubação nitrogenada 122

10. ASPECTOS PRÁTICOS RELACIONADOS AO EMPREGO DA ANÁLISE DE SOLO 125
10.1. Informações necessárias para o uso eficiente de corretivos e fertilizantes 125
10.2. Planejamento da análise de solo 126
10.3. Laboratórios de análise de solo 127
10.4. Impressos necessários 128
10.5. Amostragem 128
10.6. Envio ao laboratório 131
10.7. Os resultados de análise 131
10.7.1. Análises mais comuns 131
10.7.2. Unidades de representação 132
10.7.3. Resultados discrepantes 133
10.8. Interpretação dos resultados 134
10.9. Implementação das recomendações 134
10.10. Variações de teores no solo através de adubações e calagem 136

SUMMARY 137

LITERATURA CITADA 139

1. INTRODUÇÃO

Uma agricultura moderna exige o uso de fertilizantes e corretivos em quantidades adequadas, de forma a atender a critérios econômicos e, ao mesmo tempo, conservar a fertilidade do solo para manter ou elevar a produtividade das culturas.

Isto tudo não pode ser conseguido ignorando as condições do solo e usando formulações médias. É preciso identificar fatores limitantes e avaliar a disponibilidade dos nutrientes existentes no solo e, assim fazendo, adaptar as práticas de calagem e adubação a cada caso.

Já existem hoje muitas técnicas e conhecimentos que permitem orientar as adubações e, a medida que o tempo passa, surgem novidades à disposição dos técnicos.

Contudo, os caminhos das informações científicas são múltiplos e tortuosos e nem sempre convergentes. Aos fatos somam-se conceitos diversos, pontos de vista variados e teorias exóticas, culminando freqüentemente em um excesso de informações que dificultam a extração de conclusões de ordem prática.

Diversos conceitos e evoluções recentes sobre avaliação e controle da fertilidade do solo ainda não tiveram uma penetração adequada nos meios agronômicos. Principalmente a análise de solo ainda não é bem compreendida e seu potencial ainda pouco explorado.

O objetivo desta publicação é apresentar um conjunto de informações relacionadas com a avaliação da fertilidade do solo, principalmente no que se refere à acidez e aos três macronutrientes principais, nitrogênio, fósforo e potássio. Um aprofundamento na parte teórica foi evitado, pois, demandaria um espaço muito maior para discussão. Procurou-se, contudo, abordar superficialmente aspectos de química do solo e conceitos de fertilidade do solo, que foram considerados importantes para fundamentar os métodos de avaliação abordados no texto.

Nos capítulos 2 e 3 descreve-se a constituição do solo e os mecanismos a que estão submetidos os nutrientes e que afetam a sua disponibilidade. No capítulo 4 são recordados alguns conceitos de fertilidade, de grande importância para a compreensão de resultados experimentais. O capítulo 5 inicia a discussão de técnicas de avaliação da fertilidade do solo, detalhando-se acidez e calagem no capítulo 6, fósforo no capítulo 7, potássio no capítulo 8 e nitrogênio no capítulo 9. Finalmente, no capítulo 10 discutem-se diversos aspectos relacionados ao uso da análise de solo na avaliação e controle da fertilidade do solo.

Sabe-se que a pesquisa em agricultura é, em geral, de aplicação restrita a âmbito regional. A parte de adubação tem também esta característica, mas muito menos do que em geral se acredita. As necessidades das culturas para determinados níveis de produtividade são similares, independentemente do local onde elas são cultivadas. As diferenças em necessidades de adubação são devidas, entre um local e outro, a diferenças de disponibilidades de nutrientes. Portanto, é em propriedades de solos e comportamentos de nutrientes neles que devem ser procuradas as causas das diferenças.

Solos diferem regionalmente, por causa de diferenças de materiais de origem, de condições climáticas, de relevo, etc. Adotando-se critérios científicos para o seu estudo, em conjunto com uma experimentação bem conduzida, é possível compreender essas diferenças e equacionar a correção do solo e da adubação para cada caso.

No Brasil já há bastante trabalho realizado, embora ainda muito por fazer. Espera-se que os exemplos práticos utilizados dêem uma idéia do estágio atual de evolução em que se encontra a avaliação da fertilidade de solo e possam ser úteis para as diferentes regiões do País.

O autor gostaria de receber comentários e sugestões, ou mesmo consultas, sobre os temas discutidos nesta publicação. A troca de idéias é fundamental na orientação do trabalho de pesquisa ou de publicações futuras. As cartas podem ser dirigidas à Caixa Postal 28, CEP 13.100, Campinas-SP.

2. CONSTITUIÇÃO DO SOLO

O solo apresenta quatro fases, que são a sólida, a líquida, a gasosa e a biológica. A interação dessas quatro fases é que torna possível o desenvolvimento de vegetais no solo, graças a um conjunto de propriedades e processos que permitem a retenção de água e nutrientes e sua liberação às raízes.

2.1. Conceito de solo

O solo é a parte superficial intemperizada da crosta terrestre, não consolidada, e contendo matéria orgânica e seres vivos. Nele se desenvolvem os vegetais, obtendo através das raízes, a água e os nutrientes. O solo apresenta-se em camadas ou horizontes, chamados de O, A, B e C.

O horizonte O ocorre apenas em alguns solos. Consiste em uma camada delgada de restos orgânicos, tais como folhas, galhos e restos vegetais em decomposição. A parte inferior do horizonte O, constituída dos detritos mais antigos e semi-decompostos, é conhecida como «terra-vegetal», que é de grande interesse para cultivos de plantas ornamentais em vasos. O horizonte O só ocorre em florestas, constituindo a chamada serrapilheira.

O horizonte A do solo é a camada mineral próxima da superfície. Apresenta um acúmulo de matéria orgânica, em grande parte já humificada (a palavra húmus será definida em 2.7) e, por esta razão, apresenta-se com cor escurecida. Em muitos casos apresenta um empobrecimento relativo por perda de materiais sólidos, transloca-

dos para o horizonte B. Em solos cultivados forma-se uma camada arável, de constituição mais ou menos uniforme, representada por Ap.

O horizonte B situa-se abaixo do horizonte A. Apresenta-se com cores mais claras que o horizonte A, devido a menores teores de matéria orgânica, com um máximo desenvolvimento da estrutura e, frequentemente, com acúmulo de materiais removidos do horizonte B.

O horizonte C situa-se abaixo do horizonte B e é uma camada pouco influenciada pela ação dos seres vivos e com características mais próximas do material que provavelmente deu origem ao solo.

Finalmente, abaixo do horizonte C encontra-se a rocha, em muitos casos similar à rocha que deu origem ao solo.

Ao conjunto de horizontes denomina-se perfil do solo. Em estudos de pedologia, que é a disciplina que trata da descrição e classificação dos solos, os perfis são descritos em trincheiras abertas para essa finalidade ou em barrancos de estradas. Amostras são coletadas e levadas ao laboratório para análises. Os solos são, com base nas informações obtidas, classificados dentro de critérios definidos. Não será possível descrever essas classificações, que são bastante complexas. Uma descrição bastante acessível sobre solos e sua classificação está no livro de Lepsch (1976). São muito importantes no Brasil os solos classificados como latossolos e podzólicos vermelho-amarelos.

Em fertilidade do solo é normal procurar-se amostrar a camada arável, pois, esta é passível de modificações através de adubações e calagens. A parte de solo abaixo da camada arável é, porém, de grande importância, podendo afetar o desenvolvimento vegetal, favorável ou desfavoravelmente, dependendo das condições que apresenta para a penetração de raízes e de suprimento de nutrientes. O fato do solo abaixo da camada arável ser praticamente inalterável pelas técnicas usuais de cultivo do solo, não deve ser motivo para ignorá-lo. É importante procurar conhecer todas as características importantes do solo e adequar os cultivos às limitações existentes.

Algumas propriedades de solos distingüem-os de simples rochas moídas e decorrem da constituição peculiar que é proporcionada pela interação de seres vivos com os materiais inorgânicos. Na massa porosa do solo há retenção de água e nutrientes, que permanecem à disposição das plantas, permitindo assim o desenvolvimento dos sistemas radiculares e a absorção dessa água e desses nutrientes.

2.2. Granulometria

O solo pode ser considerado como um aglomerado de partículas unitárias de vários tamanhos, de natureza orgânica e inorgânica (ou mineral).

Quando os teores de matéria orgânica são elevados, superiores a 20%, os solos são classificados como orgânicos e não há uma preocupação maior em detalhar a granulometria das partículas minerais pois, nesses casos, a matéria orgânica domina amplamente nas propriedades. Solos orgânicos são raros e ocorrem em condições de má drenagem, onde o acúmulo de matéria orgânica é superior à decomposição.

Na maioria dos solos, os teores de matéria orgânica dificilmente atingem 5%, principalmente em se tratando de solos cultivados por algum tempo. Nesses casos, faz-se a separação e a determinação de partículas de diferentes tamanhos, estabelecendo-se a granulometria dos solos. As partículas são classificadas pelos seus diâmetros, de acordo com o que está na tabela 2.1.

Tabela 2.1. Escala internacional de classificação das frações granulométricas do solo

Fração	Limites dos diâmetros das partículas
	mm
Pedras	> 20
Cascalho	20 – 2
Areia grossa	2 – 0,2
Areia fina	0,2 – 0,02
Silte ou limo	0,02 – 0,002
Argila	< 0,002

A ocorrência de pedras e cascalhos nos solos brasileiros é bastante restrita. Para fins de análises de laboratório é utilizada apenas a parte do solo que passa na peneira com abertura de malha de 2mm, a chamada terra fina seca ao ar (TFSA) ou terra fina seca na estufa a 105°C (TFSE).

A textura é um termo empregado para designar a proporção relativa das frações argila, silte ou areias no solo. Existem triângulos para designar diversas classes texturais, principalmente utilizados na classificação de solos. De uma forma simples, uma amostra de solo é arenosa se contiver mais de 85% de areias, argilosa se contiver mais de 35% de argila e barrenta ou franca, se contiver menos de 35% de argila e menos de 85% de areias (solos siltosos são raros no Brasil). Existem termos populares para designar a textura dos solos. Solos arenosos são

considerados «leves» ou de textura «grosseira». Solos argilosos são «pesados» ou de textura «fina». Os termos leve ou pesado decorrem da menor ou maior resistência que solos arenosos ou argilosos oferecem à aração.

Um aspecto de fundamental importância é o aumento da superfície exposta das partículas, ou superfície específica, que ocorre com o aumento da proporção de partículas finas no solo. A idéia de superfície específica é fácil de compreender com um exemplo. Se for imaginado um cubo de 1g de peso e 1cm de lado, ter-se-á $6cm^2/g$ de superfície específica. Se este cubo for dividido em cubos menores, de 0,1cm de lado, a superfície específica aumenta para $60cm^2/g$. A fração argila e a matéria orgânica dos solos apresentam partículas de pequenas dimensões e, conseqüentemente, valores de superfície específica bastante elevados, da ordem de dezenas a centenas de metros quadrados por grama de material.

Diz-se que as partículas finas do solo tem alta atividade de superfície, isto significando alta capacidade de retenção de catíons, de água e de adsorção de fósforo. Por outro lado, solos excessivamente arenosos não apresentam essas propriedades em grande intensidade, o que acarreta problemas para seu uso agrícola decorrentes da baixa retenção de catíons e, principalmente, da baixa capacidade de armazenagem de água.

As frações mais finas do solo são também conhecidas como sendo de natureza coloidal. Colóides são substâncias constituídas de partículas muito maiores que átomos ou moléculas comuns, porém muito pequenas para serem vistas a olho nu. Se o solo for disperso em água (em geral após desagregação mecânica e com adição de soda), as partículas finas permanecem em suspensão por muito tempo, formando uma suspensão (ou solução) coloidal, enquanto que as partículas mais grosseiras, de limo e areia, decantam para o fundo. As partículas coloidais são as que têm elevada atividade de superfície, manifestada na retenção de água e nutrientes.

2.3. **Porosidade e agregação**

Do ponto de vista físico, o solo é um sistema trifásico, com uma fase sólida relativamente estável e com uma porosidade que pode ser ocupada com volumes variáveis de água, mas sempre complementares aos espaços ocupados por ar. A simples existência de uma mistura de partículas de diversos tamanhos já seria suficiente para permitir a existência de espaços ou poros entre as partículas. Contudo, na maioria dos solos ocorre a formação de agregados, o que permite a ocorrência de uma porosidade maior do que a que existiria sem agregação. Os

agregados (ou torrões) são aglomerados de partículas unitárias que se formam por causa de atrações físicas entre partículas, ou através de agentes cimentantes, como óxidos de ferro e matéria orgânica. Ao conjunto de agregados que ocorrem em um solo denomina-se estrutura.

Para uma boa produtividade é importante manter o solo bem estruturado, o que se consegue com manejo adequado de restos de culturas, evitando compactação excessiva e principalmente a erosão, que tende a arrastar as partículas mais finas e ricas em matéria orgânica do solo.

Podem ser reconhecidos dois tipos de poros nos solos. Os macro-poros, que são os de maior diâmetro, através dos quais a água drena e o ar se move livremente, e os micro-poros, responsáveis por retenção de água por capilaridade.

Alguns cálculos feitos em fertilidade do solo levam em consideração a retenção de água e as massas específicas dos solos.

Consideram-se dois tipos de determinação de massa específica em solos. A massa específica [1] das partículas (ou real) representa a massa da unidade de volume apenas das partículas sólidas do solo seco. Seu valor está em torno de 2,7g/cm^3, podendo ser um pouco mais elevado para solos ricos em minerais de ferro nas areias, ou menor para solos ricos em matéria orgânica. A massa específica global (ou aparente) representa a massa da unidade de volume do solo seco inalterado, incluindo pois os poros. Seu valor varia de menos de 0,5g/cm^3 de terra para solos orgânicos, até valores próximos de 2g/cm^3 para solos arenosos compactados. Os valores mais comuns estão entre 1,0 e 1,4g/cm^3 para solos minerais.

A porosidade do solo pode ser calculada pela expressão:

$$\text{Porosidade} = 1 - \frac{\text{massa específica global}}{\text{massa específica das partículas}} \qquad (2.1)$$

Um solo com massa específica global de 1,3g/cm^3 e uma massa específica de partículas de 2,7g/cm^3, tem uma porosidade de 0,52. Este é um exemplo de um solo arenoso, que tem para cada unidade de volume 0,52 ou 52% do volume tomado por poros ficando, portanto, 0,48 ou 48% do volume ocupado pela matéria sólida.

Solos argilosos apresentam massas específicas globais menores e, portanto, maiores valores de porosidade. Porém, quanto mais argiloso o solo, mais predomina a microporosidade, dependendo também da agregação.

---

[1] Também são empregadas as denominações menos corretas de densidade e peso específico.

2.4. **Retenção de água**

A água ocupa uma parte dos poros do solo, sendo o espaço restante ocupado pelo ar. A quantidade de água existente a um determinado momento é resultante das adições pelas chuvas (ou irrigações) e das remoções do solo por drenagem e pela evapotranspiração (evaporação do solo e transpiração pelas plantas).

Em condições de drenagem livre, existe um máximo de água que o solo pode reter, e que corresponde ao teor existente no solo saturado, após remoção do excesso de água quando o movimento de drenagem praticamente cessa. É a chamada capacidade de campo.

Um limite inferior importante corresponde ao teor de água no solo em que as plantas murcham de forma permanente, por não conseguirem absorver a água ainda existente. É o chamado ponto de murchamento permanente.

A água contida no solo, ou que poderia ser armazenada nele, entre o mínimo correspondente ao ponto de murchamento permanente e o máximo da capacidade de campo, corresponde à chamada água disponível.

Em laboratórios de física do solo determinam-se os potenciais de retenção de água no solo, adotando-se os valores de −1/3 atm (atmosferas) para a capacidade de campo e −15 atm para o ponto de murchamento permanente. São conceitos estáticos que descrevem apenas parcialmente a problemática de água no solo. Maiores detalhes podem ser procurados no livro de Reichardt (1978).

A água retida no solo deve de preferência ser expressa em volume retido por volume de solo em condições naturais, ou cm^3/cm^3. Ela também costuma ser expressa em porcentagem sobre peso seco de solo, isto é, quantidade de água retida por 100g de terra seca a 105°C. Ou, ainda, em milímetros de água em uma determinada profundidade de solo.

Como a porosidade em solos minerais varia da ordem de 0,7 para solos argilosos a 0,3 para solos arenosos, a capacidade de campo tem valores que podem chegar a valores da ordem de $0{,}4cm^3/cm^3$ no primeiro caso e $0{,}15cm^3/cm^3$ no segundo caso. Ou uma retenção, na camada arável de 20cm de profundidade, da ordem de 80mm para solos muito argilosos a apenas 30mm para solos arenosos.

Como a água em excesso à capacidade de campo percola através do solo, em solos arenosos a lixiviação de nutrientes através do solo, principalmente de nitrogênio em forma de nitrato, é muito mais intensa e rápida que em solos de textura mais fina.

Menores capacidades de armazenamento de água tornam as culturas mais susceptíveis a deficiências hídricas ocasionais. Nos solos argilosos a capacidade de campo é elevada, mas o ponto de murcha-

mento permanente também atinge valores consideráveis, principalmente devido aos elevados potenciais de retenção de água ocasionados pelas partículas menores e microporosidade. Em muitos casos são os solos de textura média que apresentam maiores teores de água disponível.

Apenas a textura da camada arável não é suficiente para caracterizar o suprimento de água no solo. Existem alguns solos, do grande grupo dos podzólicos, que apresentam um aumento de argila em profundidade, o que confere em certos casos uma condição surpreendente de suprimento de água às culturas.

A água pode movimentar-se no solo, das camadas mais profundas até a superfície e isto é variável de solo para solo, dependendo da continuidade da rede de poros e do seu tamanho.

Algumas plantas apresentam sistemas radiculares extensos e profundos, o que aumenta consideravelmente o volume explorado de solo e, assim, a possibilidade de absorver maiores quantidades de água, principalmente em períodos de déficits hídricos. Por outro lado, plantas susceptíveis à acidez porventura existente em profundidade, ou solos com camadas compactadas, são condições que podem impedir o desenvolvimento de sistemas radiculares em profundidade e, assim, impedir o acesso a maiores quantidades de água disponível. Essas condições desfavoráveis limitam a produtividade de culturas e, consequentemente, a resposta a fertilizantes aplicados.

2.5. **Aeração**

A composição do ar existente nos poros dos solos difere da do ar atmosférico. A dificuldade das trocas gasosas através dos poros permite que ocorra uma maior concentração de gás carbônico, CO_2, produzido pela respiração das raízes das plantas e microorganismos. Enquanto que na atmosfera os teores de CO_2 são da ordem de 0,03%, no ar do solo eles podem atingir valores acima de 1%. O oxigênio, que na atmosfera ocorre em teores da ordem de 21,0%, pode cair a menos de 20% no ar do solo (Russel, 1973).

As concentrações maiores de CO_2 no ar do solo devem-se à respiração de organismos, na qual oxigênio, O_2, é consumido e CO_2 é liberado. A respiração das raízes das plantas depende em grande parte do oxigênio do ar do solo, e é essencial para o fornecimento de energia a vários processos metabólicos, inclusive absorção de íons.

Quando o solo recebe excesso de água e é mantido nessas condições por algum tempo, ocorre um abaixamento da pressão parcial de O_2, o que dificulta a passagem do elemento para as raízes, através do filme de água existente em torno delas. Nessas condições anaeróbicas

as raízes não conseguem mais oxidar carboidratos e forma-se álcool por fermentação, com considerável prejuízo para o crescimento vegetal. As plantas variam consideravelmente em sua tolerância a condições anaeróbicas do solo (Mengel e Kirby, 1978).

O anaerobismo do solo, contrastando com as condições normais de aerobismo, tem ainda outras conseqüências prejudiciais. Havendo um favorecimento de microorganismos anaeróbicos, estes podem produzir substâncias orgânicas tóxicas, além de reduzir manganês e ferro a formas mais solúveis, que podem por vezes atingir níveis tóxicos, principalmente o primeiro. Pode ocorrer a denitrificação, que consiste na transformação de nitrogênio nítrico em formas gasosas que se perdem para a atmosfera. É, portanto, importante evitar o encharcamento dos solos e suas conseqüências produzidas por condições anaeróbicas.

Em alguns casos, plantas em condições anaeróbicas são afetadas por toxinas que produzem sintomas que assemelham-se à murcha. É um problema bastante comum em plantas ornamentais domésticas, quando um excesso de água leva a sintomas que simulam a falta de água, provocando adições de maiores quantidades desta, agravando assim o problema do anaerobismo, frequentemente com conseqüências fatais.

2.6. **Minerais do solo**

A fração mineral ou inorgânica representa a maior parte da fase sólida dos solos bem drenados que não apresentam acúmulo anormal de matéria orgânica. Ela é constituída de diversos minerais, que são compostos formados em geral por processos inorgânicos e que ocorrem naturalmente na crosta terrestre.

Os minerais do solo costumam ser separados em minerais primários e secundários. Os minerais primários são aqueles que existem normalmente em rochas ígneas e podem persistir até no solo. Os minerais secundários são formados pela decomposição dos minerais primários por processos químicos e recombinação em novos minerais. Os minerais secundários podem formar-se no próprio solo ou, o que é mais comum, durante processos gerais de intemperismo e translocação de elementos químicos que dão origem à formação de rochas sedimentares e metamórficas.

O intemperismo é um processo que atua na litosfera e consiste em um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que levam à desagregação física e à decomposição química dos minerais das rochas expostas às condições atmosféricas. Os processos gerais do

intemperismo estão sempre presentes no solo, manifestando-se por desagregação, solubilização, hidrólise, hidratação, redução, carbonatação e dessilificação.

De uma forma geral, apenas nove elementos constituem a maior parte das rochas ígneas. São eles oxigênio, silício, alumínio, ferro, cálcio, sódio, potássio, magnésio e titânio. Oxigênio é o elemento mais abundante em peso e, principalmente, em volume, formando pontes de ligação entre os demais elementos em quase todos os minerais. É comum expressar os resultados de análises químicas de rocha em termos de óxidos. Oxigênio, silício, ferro e alumínio dominam a composição química das rochas ígneas.

Quando os solos se formam, a partir de rochas ou sedimentos não consolidados, alguns elementos químicos são perdidos, outros sofrem uma concentração relativa. Ocorrem perda de cálcio, magnésio, potássio, sódio e silício. O ferro e o alumínio, que não são em geral removidos, aumentam em concentração, bem como titânio e manganês, que apareceu em teores menores. O fósforo, embora para a agricultura seja um elemento pouco móvel no solo, é removido em grande parte nos processos de transformação de rochas em solos.

As condições de clima tropical úmido são muito favoráveis ao acentuado intemperismo, o que se deve à alta temperatura associada com umidade, e uma constante remoção de elementos pela lixiviação promovida pela água que percola através do perfil. Encontram-se, assim, nas regiões tropicais, os solos mais intemperizados, chamados latossolos ou oxisols, que contém em sua fração argila uma predominância de ferro, alumínio e silício.

Os minerais existentes no solo refletem o material de origem e os processos de intemperismo.

As areias e em menor proporção, o limo, contém em geral os minerais primários mais resistentes. Destaca-se o mineral quartzo, SiO_2, que, pela sua resistência, é o mineral mais abundante das areias de quase todos os solos, excetuando-se apenas aqueles solos formados de rochas pobres em quartzo.

Na fração argila são encontrados os chamados minerais de argila e óxidos de ferro e alumínio. Na tabela 2.2. são apresentadas as composições químicas de minerais que podem ocorrer na fração argila de solos. A estrutura dos minerais de argila é bastante complexa e não será discutida aqui. Alguns aspectos merecem destaque, pois, dizem respeito a importantes propriedades físicas e químicas de solos.

A caulinita apresenta estruturas laminares, com uma camada de estruturas de sílica e outra camada de estruturas de alumina. Por esta razão, o mineral é conhecido como mineral de argila do tipo 1:1. Já a ilita, a montmorilonita e a vermiculita apresentam duas camadas de síli-

ca para cada de alumina, e são chamados minerais de argila do tipo 2:1. Os teores de SiO_2 e Al_2O_3 da tabela 2.2. refletem isso.

Tabela 2.2. Exemplos de composição química de amostras de alguns minerais de argila que são encontrados em solos

	Mineral			
	Caulinita	Illita	Montmorilonita	Vermiculita
SiO_2	45,80	56,91	51,14	34,04
Al_2O_3	39,55	18,55	19,76	15,37
MgO	0,14	2,07	3,22	22,58
K_2O	0,03	5,10	0,04	0,00
TiO_2	— —	0,81	— —	— —
Fe_2O_3	0,57	4,99	0,83	8,01
FeO	0,18	0,26	— —	— —
CaO	0,41	1,59	1,62	0,00
Na_2O	— —	0,43	0,11	0,00
H_2O+	13,92	5,98	7,99	19,93
H_2O	0,17	2,86	14,81	— —

Fonte: Deer e outros (1969). An introduction to rock forming minerals. Wiley, New York, 1966.

Também merecem destaque os elevados teores de K_2O da ilita e MgO da vermiculita. Os três minerais de argila do tipo 2:1 são relativamente ricos em silica e cátions básicos, potássio, magnésio ou cálcio. Por esta razão, não persistem em condições de climas quentes e úmidos, favoráveis ao intemperismo e à remoção desses componentes. Em regiões tropicais, podem ser encontrados em horizontes C de alguns solos, em solos muito rasos, em condições de má drenagem ou em climas semi-áridos.

Os minerais de argila do tipo 2:1 caracterizam-se por elevada superfície específica, que no caso da montmorilonita pode chegar a $600m^2/g$. Deve-se isto a uma interessante propriedade desses minerais, que expandem-se e apresentam superfícies internas que participam dos fenômenos que afetam nutrientes no solo, principalmente troca de cátions. A capacidade de troca de cátions, como será visto no capítulo 3, é muito elevada em argilas do tipo 2:1.

Mais pertinentes aos solos que ocupam a maior parte da su-

perfície do País, são os minerais que predominam na fração argila dos chamados solos latossolos e podzólicos (tabela 2.3.). Eles refletem as severas condições de intemperismo do clima tropical úmido.

Tabela 2.3. Minerais que predominam na fração argila de solos latossólicos e podzólicos

Denominação	Fórmula
Caulinita	$Al_4 [Si_4O_{10}] (OH)_8$
Goetita	$FeO \cdot OH$
Gibsita	$Al(OH)_3$

Além dos três minerais da tabela 2.3., pode ocorrer em solos um mineral amorfo, com uma relação de sílica para alumina não muito definida, mas menor que a da caulinita. Este mineral, conhecido como alofana, pode provavelmente ser encontrado em pequenas proporções em solos do Brasil. É muito importante em solos derivados de cinzas vulcânicas, que ocorrem nas regiões andinas, América Central, Havaí, Japão e em outras partes do mundo com atividade vulcânica recente ou atual.

É preciso não confundir as expressões «fração argila», que refere-se a partículas menores do que 0,002mm, e «minerais de argila», que refere-se a um grupo de minerais.

Os minerais imprimem aos solos importantes propriedades.

A areia facilita o cultivo dos solos, já que solos excessivamente argilosos são de difícil cultivo, principalmente se a argila for do tipo 2:1. Por outro lado, solos arenosos tem baixas capacidades de retenção de água e catíons.

Óxidos de ferro e alumínio, associados com caulinita e matéria orgânica, uma combinação comum em latossolos, confere a esses solos uma estrutura fina muito estável, que facilita cultivos e condiciona uma alta permeabilidade e uma elevada aeração. A retenção de água é, contudo, relativamente baixa.

Os minerais também afetam diretamente as propriedades químicas dos solos. Os minerais das areias, pela sua baixa superfície específica, podem ser considerados inertes. Os óxidos de ferro e alumínio apresentam baixa capacidade de troca de catíons, uma alta capacidade de adsorver fósforo e uma possibilidade de absorver aníons como sulfato e mesmo nitrato. A caulinita tem uma baixa capacidade de

troca de catíons e também adsorve fósforo. Os minerais de argila 2:1 tem alta capacidade de troca de catíons e podem «fixar» potássio.

2.7. A matéria orgânica

A matéria orgânica é um dos componentes essenciais que diferencia solos do regolito. O desenvolvimento gradativo de vegetais, fixando o carbono a partir do CO_2 atmosférico, incorporando nitrogênio, em pequenas adições anuais, proveniente em parte das águas de chuva e em parte da fixação do nitrogênio do ar atmosférico por parte de microorganismos, permite o acúmulo progressivo de matéria orgânica em solos. Em um determinado ecossistema em equilíbrio, o teor de matéria orgânica do solo é constante, refletindo o equilíbrio entre a adição de restos orgânicos de seres vivos e a decomposição por mineralização. Em geral ocorrem teores maiores de matéria orgânica em solos mais argilosos.

No solo existe matéria orgânica em vários estágios de decomposição. Denomina-se húmus aquela matéria orgânica escura, bem decomposta e relativamente estável, na qual não é mais possível reconhecer a sua origem.

A matéria orgânica incorpora ao solo dois elementos químicos essenciais, que não existem no material de origem: carbono e nitrogênio. O último é o nutriente mais importante do ponto de vista quantitativo, e só este fato já seria suficiente para justificar a importância da matéria orgânica, como fonte de nitrogênio. Fósforo e enxofre são dois outros nutrientes encontrados em importantes proporções na matéria orgânica do solo.

Do ponto de vista químico, o húmus é constituído principalmente por carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e fósforo. A composição química não é definida, e nem poderia ser, considerando a multiplicidade de resíduos orgânicos que participam na formação do húmus. Contudo, alguns componentes gerais do húmus, em geral de peso molecular elevado, incluem polissacarídeos e proteínas e outras substâncias de composição incerta.

Para fins práticos considera-se que o húmus tem em média 58% de carbono e, portanto, %C x 1,72 = % de matéria orgânica. Da mesma maneira, podem ser admitidos como números em torno dos quais se fixa o raciocínio, no caso de matéria orgânica estabilizada de solos bem drenados, as relações 100:10:1:2 para C:N:S:P. Esses números são ordens de grandeza apenas, mas são úteis para orientar a discussão sobre disponibilidade das formas orgânicas dos três nutrientes. Excelentes discussões sobre essas relações podem ser encontrados em dois clássicos da literatura edafológica (Russell, 1973; Tisdale & Nelson, 1975).

O húmus ou a matéria orgânica do solo não é apenas uma fonte de nutrientes. Talvez tão ou mais importantes sejam as notáveis propriedades de natureza coloidal que apresenta, que são decorrentes de sua estrutura orgânica complexa aliada a uma fina subdivisão de partículas. A matéria orgânica atua na agregação de partículas, conferindo ao solo condições favoráveis de arejamento e friabilidade. Além disso, ela aumenta a retenção de água em solos e é responsável em grande parte pela capacidade de troca de catíons.

2.8. Constituição do solo e produtividade

Solos diferem entre si em uma série de características e propriedades. Podem ser encontradas varições em composição mineralógica, granulometria, profundidade, riqueza em nutrientes, capacidade de retenção de água, porosidade, etc. É difícil e freqüentemente impossível precisar como cada uma dessas variáveis irá afetar a produtividade de culturas. A pesquisa sobre relações solo-planta é muito incipiente no Brasil, para permitir organizar as informações disponíveis de solos, de forma a equacionar a produtividade potencial em termos de parâmetros de solo e clima.

Existem, no caso da fertilidade do solo, variáveis de solo que podem ser alteradas em benefício de maiores produtividades de culturas, e que são discutidas nos próximos capítulos. Aqui interessa discutir aquelas características e propriedades de solos que afetam a produtividade mas não podem ser facilmente modificadas. Se elas afetam a produtividade, devem ser consideradas na avaliação da fertilidade do solo e na adubação.

A granulometria pode afetar a produtividade, embora seja difícil quantificar esse efeito por falta de resultados experimentais. Solos muito arenosos apresentam também baixos teores de matéria orgânica e baixa capacidade de retenção de água. Em condições de cultivo sem irrigação, a falta de água em períodos de estiagem é provavelmente o fator limitante principal da produtividade desses solos.

Solos bem estruturados, com agregados estáveis, são em geral melhores e podem apresentar produtividades mais elevadas do que solos sem estrutura ou compactados. Nestes últimos podem haver dificuldade de penetração de raízes e, assim, limita-se a absorção de água e nutrientes.

Os minerais do solo, principalmente da fração argila, afetam a retenção de nutrientes de forma diversa, como será visto adiante. Em geral, porém, os problemas podem ser contornados por medidas adequadas a cada caso.

A matéria orgânica é um componente que merece um cuidado todo especial. As quantidades em geral existentes no solo são decorrentes de séculos ou milênios de acúmulo. O efeito favorável na produtividade deve-se aos inúmeros benefícios que confere às propriedades físicas do solo, além da retenção e fornecimento de nutrientes. O problema sério é que é muito difícil aumentar ou mesmo conservar os teores existentes no solo. Na agricultura que se pratica em nosso País, em geral está-se provocando uma diminuição dos teores de matéria orgânica, em parte porque isto é uma tendência natural em solos cultivados originalmente sob floresta, mas, principalmente, por manejos inadequados, pouco se praticando rotações de culturas ou medidas de conservação do solo. É provável como conseqüência, solos de menor produtividade, por melhor que sejam depois as técnicas de cultivos ou adubações praticadas.

3. MECANISMOS DE INTERAÇÕES ENTRE SOLOS E NUTRIENTES

No capítulo 2 foi descrita a constituição do solo, sem entrar-se em detalhes sobre os processos que atuam sobre os nutrientes. Estes serão discutidos agora.

Dentro do solo ocorrem fenômenos de natureza química, física ou biológica, que afetam os nutrientes vegetais. Os mecanismos envolvidos são diversos e podem afetar os nutrientes diferentemente, em alguns casos aumentando a sua disponibilidade, em outras diminuindo-a.

Em fertilidade do solo procura-se conhecer aquelas propriedades químicas que afetam a produção de culturas, com o intuito de controlar as que podem ser alteradas, em benefício de maiores produtividades.

Destacam-se como fenômenos de grande importância geral, a troca de íons, a adsorção de fosfatos e os processos biológicos envolvendo principalmente nitrogênio.

3.1. A solução do solo

O solo é uma massa porosa e já foi dito que parte da porosidade é normalmente ocupada por água. Na realidade não se trata de água pura, mas sim de uma solução, contendo diversos solutos que afetam as plantas, principalmente nutrientes e elementos tóxicos. Essa solução distribui-se nos poros de menor tamanho e como filmes em torno das partículas de natureza coloidal. Trata-se de uma solução irregularmente distribuída pela rede de poros e filmes, sujeita a variações de concentrações, mesmo a curtas distâncias.

Apesar deste aspecto de heterogeneidade do solo, muitos estudos teóricos são feitos com modelo que admitem a parte sólida do solo como uma superfície em contacto com uma fase líquida, a solução do solo. Existe entre essas duas fases a interface sólido-líquido, que é a sede de importantes fenômenos envolvendo diversos elementos químicos.

Há em geral uma condição de equilíbrio entre os componentes da solução do solo e os existentes na fase sólida, na superfície das partículas sólidas. É evidente que somente elementos que estão na superfície das partículas podem participar de tal equilíbrio, pois, elementos que estão no interior de estruturas sólidas não são móveis.

A absorção de elementos químicos pelas raízes das plantas dá-se a partir da solução do solo. Hoje não se aceita mais a teoria de trocas diretas entre partículas do solo e as raízes. Portanto, é importante saber em que formas os nutrientes encontram-se em solução. As principais formas dos macronutrientes e alguns elementos importantes que ocorrem na solução do solo são:

Nitrogênio: NO_3^-, NH_4^+
Fósforo: $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}
Potássio: K^+
Cálcio: Ca^{2+}
Magnésio: Mg^{2+}
Enxofre: SO_4^{2-}
Hidrogênio: H^+
Cloro: Cl^-
Alumínio: Al^{+3} (e polímeros)
Sódio: Na^{2+}

Dos macronutrientes, três apresentam-se como catíons apenas, ou seja, potássio, cálcio e magnésio. O fósforo apresenta-se na forma dos aníons ortofosfatos e o enxofre como sulfato. O nitrogênio é o único macronutriente que pode estar na forma de catíon ou de aníon, respectivamente como amônio e nitrato.

Os quatro outros elementos listados são importantes quantitativamente em solos. O hidrogênio destaca-se por seu papel na acidez dos solos, como será discutido no capítulo dedicado a acidez e calagem. O alumínio, por ser um importante elemento tóxico em solos ácidos. O sódio, por ser um catíon que pode ocorrer em teores trocáveis bastante elevados, principalmente em solos próximos ao mar ou de regiões semi-áridas. E, o aníon cloreto, por ser adicionado em grandes quantidades ao solo através das adubações potássicas com cloreto de potássio.

Embora reconheça-se a importância da solução do solo na nutrição vegetal, o estudo de sua composição é extremamente difícil. Isto devido à dificuldade de extrair dos solos, a água existente e retida a tensões consideráveis. Os teores dos nutrientes em solução são bai-

xos, as quantidades existentes em solução em geral não são suficientes para o suprimento das culturas e, portanto, há necessidade de reposição dos nutrientes em solução que são absorvidos pelas plantas, através de liberação da fase sólida.

Esta é a razão porque hoje procura-se raciocinar em termos de que existe em solução e na fase sólida. A concentração do nutrientes em solução é denominada de fator intensidade, enquanto que o nutriente na fase sólida que pode passar para a solução é o fator quantidade.

É importante frisar que na solução do solo ocorrem catíons e aníons em quantidades estequiometricamente equivalentes, isto sem considerar os catíons trocáveis adsorvidos na superfície das partículas, que serão discutidos a seguir.

3.2. **Retenção e troca de catíons e aníons**

A propriedade de troca de íons em solos tem sua origem em um excesso de carga existente nas partículas sólidas. Predomina na maioria dos solos a troca de catíons e, por esta razão, ela será focalizada com maior ênfase.

A maioria dos solos apresenta um excesso de carga negativa na superfície das partículas. Este excesso de carga é contrabalançado por catíons, os chamados contra-íons e que estão na solução do solo. Além dos contra-íons, ocorrem na solução do solo íons de mesma carga que a da superfície, chamados de co-íons. Na realidade, a quantidade de contra-íons existentes é superior, em termos de cargas elétricas, às cargas da superfície. Isto porque, o princípio da eletroneutralidade exige que a soma de cargas seja zero. Assim, a soma de cargas positivas dos contra-íons deve ser igual à soma das cargas negativas do solo com as das cargas negativas dos co-íons. Por outro lado, a concentração dos co-íons define a quantidade de sais existente na solução do solo.

Os cátions trocáveis, bem como os aníons, movem-se livremente na solução, sendo impedidos apenas pela atração elétrica, mas sempre sujeitos à troca catiônica. Assim, um catíon Ca^{2+}, pode ser trocado por uma quantidade equivalente de qualquer catíon do mesmo sinal. A figura 3.1. ilustra as relações dos íons trocáveis e a superfície do solo.

Note-se que a carga negativa da superfície é contrabalançada por uma quantidade equivalente de catíons em solução, já que o sistema deve ser mantido neutro. Mais distante da superfície das partículas do solo são encontrados os co-íons ou aníons que, por terem carga negativa, são repelidos pela carga negativa da superfície do solo, mantendo-se a uma certa distância. Também neste caso a eletroneutralidade é

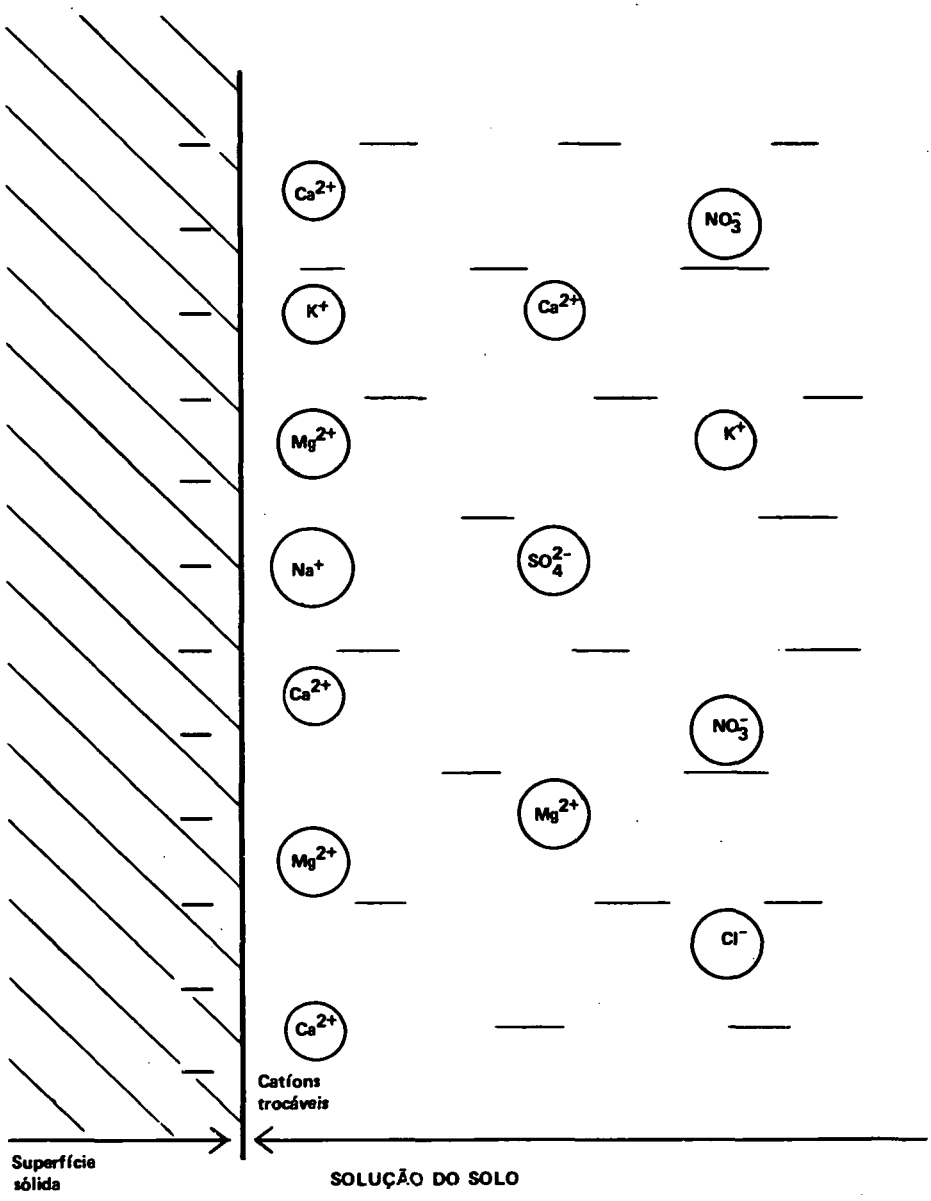

Figura 3.1. Representação esquemática da solução do solo adjacente à superfície negativa. Note-se que além dos catíons trocáveis ou contra-íons, existem na solução mais distante da superfície, catíons cujas cargas contrabalançam as dos co-íons ou aníons.

mantida, o que deve-se aos catíons existentes na solução do solo. Estes íons em excesso aos catíons trocáveis constituem os sais da solução do solo, e são os responsáveis por diversos fenômenos de interesse, tais como absorção de catíons pelas plantas, salinidade e lixiviação. Os catíons em solução estão em equilíbrio com os trocáveis de forma que, durante a absorção de um deles pela planta, como o potássio por exemplo, pode ocorrer a reposição dos teores trocáveis, através de troca com outros catíons em solução.

Os catíons são retidos pelo solo, na seguinte ordem, denominada série liotrópica:

$$Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > Na^{+} \qquad (3.1)$$

O primeiro fator determinante da atração é a carga dos catíons; o segundo é o tamanho dos íons hidratados, os menores sendo retidos com maior energia. Consequentemente, em solos bem drenados, a freqüência natural de ocorrência dos catíons trocáveis é, em geral, na ordem dada, mesmo quando o solo formou-se de rochas mais ricas em magnésio ou potássio, por exemplo. Desvios da seqüência dada ocorrem em condições de má drenagem ou, em alguns casos, por liberação de magnésio ou potássio de minerais primários, o que é mais comum em profundidade, em alguns solos.

Quando se adiciona calcário dolomítico ao solo, por vezes os teores de magnésio igualam ou superam os teores de cálcio. Com o tempo, porém, ocorre uma maior remoção de magnésio do solo, retornando a proporção normal de maiores teores de cálcio.

Até agora foi omitido da discussão o íon hidrogênio, o que foi feito de propósito. Trata-se de um elemento que apresenta um comportamento específico e extremamente importante, e a consideração dele em conjunto com os cátions trocáveis é inconveniente.

Ressalte-se, também, a existência de catíons e aníons na solução do solo, além dos catíons trocáveis, e a necessidade de ser mantido a eletroneutralidade do sistema.

Estes dois últimos aspectos não costumam ser distingüidos ou salientados ao se tratar de processos de troca de íons em solos. No entanto, sem o seu conhecimento, é difícil explicar com precisão certos fenômenos importantes, como lixiviação de nutrientes e equilíbrio iônico.

3.3. **Origem da troca de íons em solos**

Aqui será discutida a origem da troca de catíons e da troca de aníons em solos. Esta última pode ocorrer em certos casos em que os solos adquirem carga positiva na superfície das partículas, ao invés de negativa.

Três grupos de materiais são responsáveis pela troca de íons em solos: a matéria orgânica, os minerais de argila e os óxidos hidratados de ferro e alumínio. Os mecanismos de desenvolvimento ou existência de cargas nesses materiais merece uma explicação.

Uma classificação muito comum divide as cargas negativas dos solos em cargas permanentes e cargas dependentes de pH. As cargas permanentes existem nas estruturas dos minerais e, por esta razão, estão sempre operantes. Já as cargas dependentes de pH são efetivas ou não, dependendo do pH do meio. A seguir é dada uma explicação de como as cargas negativas dependentes de pH variam nos solos e como podem ocorrer as cargas positivas. O papel especial do íon hidrogênio será também demonstrado.

Os óxidos hidratados de ferro e alumínio podem desenvolver, em suas superfícies, cargas negativas e positivas e, portanto, podem apresentar-se como trocadores de catíons ou aníons. Na figura 3.2. é mostrado esquematicamente como pode ocorrer o desenvolvimento de cargas na superfície dos óxidos hidratados de alumínio. Para óxidos de ferro o mecanismo é o mesmo.

Com a elevação do pH ocorre a dissociação das hidroxilas da superfície e, assim, a liberação de cargas negativas para troca de catíons. Por outro lado, com a acidificação do meio ou abaixamento do pH, a superfície do óxido adsorve íons H^+ e passa a apresentar carga positiva, e, portanto, troca de aníons. Portanto, aníons como NO_3^-, SO_4^{2-} e Cl^- podem ser retidos nessas condições, mas isto não é uma ocorrência comum. É difícil precisar para óxidos de ferro e alumínio, principalmente ocorrendo em solos associados com matéria orgânica e outros minerais, as condições exatas de desenvolvimento de cargas positivas. As condições favoráveis são em valores de pH abaixo de 6, teores relativamente altos de óxidos de ferro e alumínio e baixos de matéria orgânica. Essas condições são encontradas nas partes profundas de latossolos.

As cargas dependentes de pH, tanto positivas como negativas, e ambas podem ocorrer ao mesmo tempo em solos, aumentam com o aumento da concentração salina. Isto tem importantes implicações na lixiviação de sais através de solos. Se só ocorrem cargas negativas, os sais acompanham a água que drena através do solo. Se ocorrem cargas positivas e negativas, a translocação do sal provocará o aumento das cargas positivas, além das negativas, que retardam o deslocamento em relação à frente de água.

A magnitude das cargas dos óxidos em solos do Brasil provavelmente é de apenas alguns miliequivalentes por 100g de mineral.

O mineral de argila mais importante em solos das regiões tropicais úmidas, a caulinita, também tem uma capacidade de troca de catíons baixa, provavelmente bem abaixo de 10 meq/100 g de material.

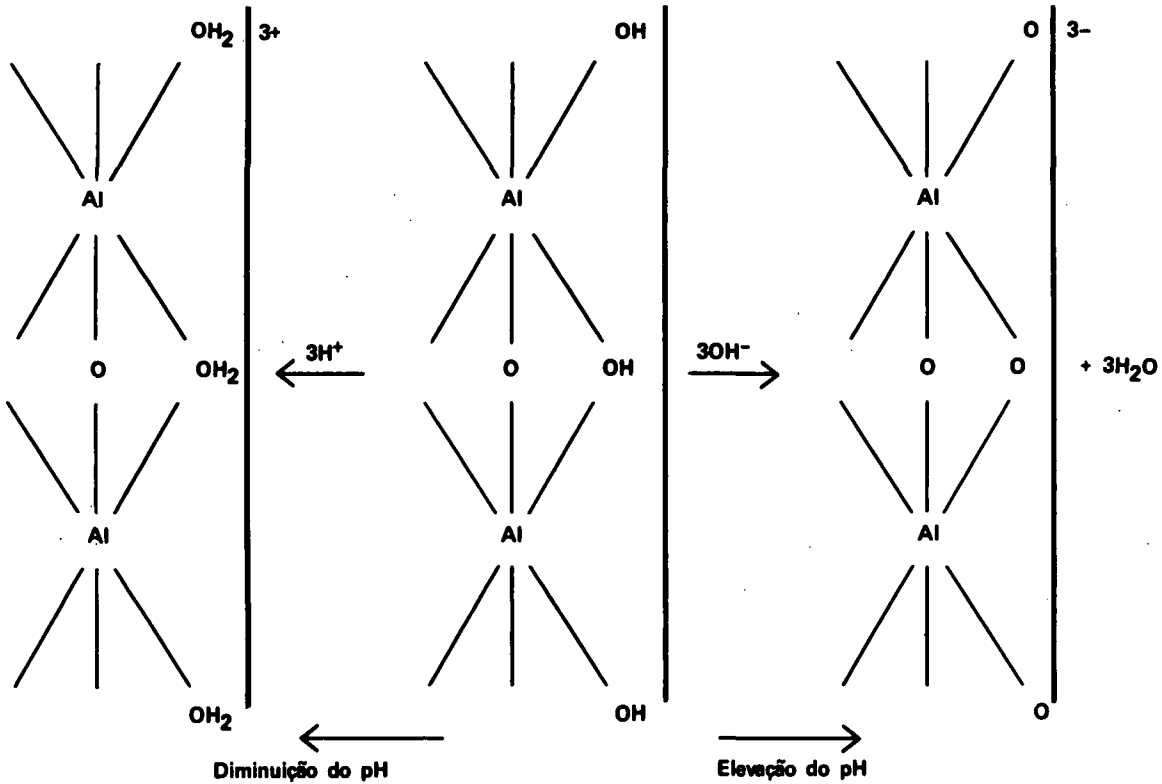

Figura 3.2. Esquema de desenvolvimento de cargas positivas ou negativas em óxido hidratado de alumínio.

Pode apresentar cargas positivas em condições extremas de acidez. As cargas do mineral são predominantemente do tipo pH dependente e desenvolvem-se de maneira similar à descrita na figura 3.2.

Outros minerais de argila apresentam somente a propriedade de troca de catíons, com capacidades que variam de cerca de 40 meq/100g para a ilita, 120 para a montmorilonita e 150 para a vermiculita. Nesses minerais o mecanismo de formação das cargas é diferente. Elas são devidas a substituições isomórficas que existem na estrutura dos minerais. Substituições isomórficas consistem na substituição de íons na estrutura dos cristais por outros de aproximadamente o mesmo tamanho, porém com carga diferente. Assim, pode haver substituição de Si^{4+} por Al^{3+} e de Al^{3+} por Mg^{2+}. Como a estrutura perfeita dos minerais apresentaria eletroneutralidade se não ocorressem substituições isomórficas, estas ocorrendo, produzem um déficit de carga positiva ou um excesso de carga negativa, que é balanceada pelos catíons trocáveis existentes nas superfícies dos minerais. Estas cargas assim originadas, são de caráter permanente, ao contrário das cargas que ocorrem em óxidos, caulinita e na matéria orgânica, que apenas manifestam-se se as condições de acidez o permitirem.

A matéria orgânica do solo apresenta valores de capacidade de troca de cátions da ordem de 200 a 400 meq/100g. Ela é do tipo pH-dependente, originando-se por dissociação de hidroxilas de grupamentos carboxílicos, fenólicos, etc. O mecanismo tem algumas similaridades com o caso de desenvolvimento de cargas negativas e positivas da figura 2, porém na matéria orgânica as cargas negativas desenvolvem-se a valores de pH bem mais baixos do que nos óxidos e é provável que raramente as condições de acidez sejam suficientes para a ocorrência de cargas positivas.

As cargas dependentes do pH do solo variam, como o termo sugere, com o pH. Na prática convencionou-se determinar a chamada capacidade de troca de catíons (CTC) a pH 7. O valor obtido inclui as cargas dependentes de pH que desenvolvem-se a pH 7 e todas as cargas permanentes do solo.

No solo é impossível precisar a contribuição dos componentes do solo, diferentes minerais de argila, óxidos e matéria orgânica, para a CTC, já que estes materiais encontram-se intimamente associados. É possível, contudo, determinar a contribuição da matéria orgânica e da fração mineral e resultados são apresentados na tabela 3.2. Pode-se perceber que a matéria orgânica, apesar de ocorrer em teores bem mais baixos que a fração argila, é a principal responsável pela CTC nos solos dos exemplos.

Tabela 3.1. Capacidade de troca de catíons de amostras de solos, total e da matéria orgânica

Legenda do solo	Profundidade	Argila	Matéria orgânica	CTC		CTC devida à matéria orgânica
				Total	Da matéria orgânica	
	cm	%	%	meq/100g de terra		%
PVls	0– 6	5	0,78	3,2	2,2	69
Pml	0–15	6	0,60	3,3	2,1	64
Pln	0–14	12	2,52	10,0	8,2	82
Pc	0–16	19	2,40	7,4	6,0	81
PV	0–12	13	1,40	3,7	2,7	73
TE	0–15	64	4,51	24,4	15,0	62
LR	0–18	59	4,51	28,9	16,1	56
LEa	0–17	24	1,21	3,9	2,9	74

Fonte: Raij, B. van. Bragantia 28:85-112, 1969.

3.4. Equilíbrio de catíons trocáveis e em solução

Do ponto de vista estático, a existência de cargas negativas na superfície das partículas do solo, responsáveis pela adsorção de catíons, permite ao solo funcionar como um reservatório de nutrientes. Do ponto de vista dinâmico, os catíons trocáveis regulam a composição da solução do solo.

Os catíons na solução do solo e os trocáveis estão em equilíbrio. A maior parte deles encontra-se na forma trocável e apenas uma pequena parte em solução. Se considerar-se, por exemplo, um solo contendo 5 meq/100g de cátions trocáveis, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} e Na^{+}, uma concentração de cátions na solução do solo de 2 meq/litro e uma retenção de água de 25%, a quantidade de cátions em solução será de 0,05 meq/100g de terra, ou 1% do total.

A concentração de catíons em solução depende da concentração de sais ou aníons, já que os catíons que estão em solução, além dos trocáveis, são os que contrabalançam as cargas negativas dos coíons.

Existem muitos trabalhos visando relacionar as concentrações dos cátions em solução e os catíons trocáveis. Tem sido muito utilizada para esta finalidade a equação de Gapon, citada por Mengel e

Kirkby (1978), e apresentada assim, em um exemplo somente com potássio e cálcio:

$$\frac{K^+ \text{ troc.}}{Ca^{2+} \text{ troc.}} = k \frac{K^+ \text{ sol.}}{Ca^{2+} \text{ sol.}} \qquad (3.2)$$

onde K^+ troc. e Ca^{2+} troc. representam os cátions trocáveis, K^+ sol. e Ca^{2+} sol. as atividades ([1]) dos catíons em solução, expressas em molaridade, e k é a constante de Gapon, característica para as condições experimentais, que envolvem tipos de colóides, densidade de cargas e saturação de catíons.

Como foi visto, os catíons em solução representam apenas uma pequena fração da quantidade de catíons trocáveis. Devido a isso, se a depleção dos trocáveis não for excessiva, o que é mais importante na equação 3.2. é a relação de atividades, K^+ sol./$\sqrt{Ca^{2+}}$ sol., que passa a ser constante se não se alterarem as quantidades dos catíons trocáveis. Este fato foi mencionado na forma da «lei das relações» por Schofield (1947), da seguinte forma: «quando catíons em solução estão em equilíbrio com uma quantidade maior de catíons trocáveis, uma mudança na concentração da solução não perturbará o equilíbrio se as concentrações dos catíons monovalentes variarem em uma relação, e as concentrações dos catíons divalentes variarem na raiz quadrada dessa relação».

A concentração da solução do solo pode variar, pela extração de alguns catíons pelas plantas, em geral em proporções diferentes das que ocorrem em solução, pela adição de sais como adubos, pela diluição da solução do solo por água adicionada e pela concentração provocada pela evaporação de água. Em cada um desses casos, deve ocorrer o ajuste dos catíons em solução à custa dos catíons trocáveis, a fim de ser obedecida a equação 3.2. e mantido o equilíbrio iônico.

A equação 3.2., ou outras similares que levam às mesmas conclusões, tem importantes aplicações práticas, destacando-se aquelas relacionadas com disponibilidade de potássio, lixiviação de potássio e com a relação sódio e cálcio em solos alcalinos. As duas primeiras serão discutidas posteriormente.

([1]) Atividade = concentração x f, onde f é um fator que depende das concentrações de íons e é igual ou menor que 1. Para fins práticos, em soluções com teores baixos de sais, é comum usar-se concentração em lugar de atividade.

3.5. **Adsorção de fosfatos**

Quando se tratou de troca de aníons em solo, não foi mencionado o que acontece com aníons $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-}, que ocorrem na solução do solo, embora em teores muito baixos, em geral inferiores a 0,1 μg/ml de P em solução. Em princípio esses aníons participariam, tal como NO_3^-, Cl^- e SO_4^{2-}, de troca de aníons, nos casos em que ela ocorre, ou mais comumente, seriam repelidos da superfície do solo pela carga negativa e permanecendo como co-íons no interior da solução do solo.

Contudo, os fosfatos estão sujeitos a outro mecanismo, que sobrepuja em importância qualquer possibilidade de envolvimento de fósforo nas reações de troca iônica.

O fósforo tem tendência a formar diversos compostos de solubilidade muito baixa com ferro, alumínio e cálcio, entre outros elementos. Esta afinidade com estes três catíons, tão abundantes em solos, é a razão pela qual o fósforo inorgânico ocorre ligado a ferro, alumínio e cálcio. A ligação pode dar-se em solução, com os íons formando precipitados ou pela adsorção dos fosfatos na superfície de partículas de argila, óxidos de ferro e alumínio, ou de carbonato de cálcio em solos calcários. O importante é a natureza da ligação que se estabelece, que é do tipo covalente, de alta energia. A adsorção de fosfatos no solo dá-se, então, por um mecanismo que não tem relação com a troca iônica.

Na figura 3.3. é ilustrado um dos mecanismos propostos para a adsorção de fosfatos em solos. Comparando com a figura 3.2. percebe-se a diferença nos mecanismos de adsorção. No caso da troca iônica ocorre apenas adsorção ou dissociação de H^+, enquanto que no caso dos fosfatos há uma alteração da superfície, do óxido no exemplo da figura.

O que dificulta a reversão da reação ilustrada na figura 3.3. é a baixa solubilidade dos compostos de fósforo. É comum citar-se como três dos mais importantes minerais de fósforo que podem ocorrer em solos, os seguintes:

Apatita — $Ca_5(PO_4)_3(OH, F)$
Strengita — $FePO_4.2H_2O$
Variscita — $FePO_4.2H_2O$

No caso, da variscita, por exemplo, o chamado produto de solubilidade foi determinado por Wright e Peech (1960) para extratos de solos ácidos, obtendo-se:

$$(a_{Al^{+++}})\ (a_{OH^-})^2\ (a_{H_2PO_4^-}) = 10^{-30,5} \qquad (3.3)$$

Consideraram aqueles autores que era o produto de solubilidade da variscita que controlava os teores de fósforo em solução, de

acordo com a equação. Na prática isto significa que, se aumentar o teor de alumínio na solução do solo, deve diminuir o de fosfato. Considerações idênticas podem ser feitas para strengita e apatita. A valores de pH baixos há tendência de formação de fosfatos de ferro e alumínio em solos. A valores de pH mais elevados e em condições de alta saturação de cálcio, é a apatita o mineral mais importante. Em qualquer caso, o produto de solubilidade só permite concentrações muito baixas de $H_2PO_4^-$ em solução.

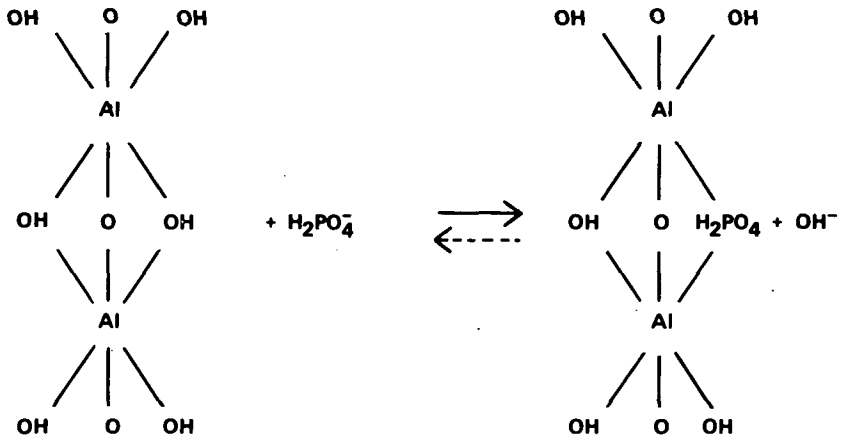

Figura 3.3. Esquema de adsorção de fósforo em superfície de óxido hidratado de alumínio.

É difícil encontrar esses minerais em formas definidas em solos, pois, há diversos outros compostos de fósforo que podem-se formar.

Partindo deste ponto com a informação de que os fosfatos reagem no solo ou são adsorvidos na superfície das partículas, não sendo possível a ocorrência de concentrações muito elevadas na solução do solo devido à baixa solubilidade dos fosfatos formados, é interessante examinar o que acontece quando fosfatos solúveis são adicionados a solos.

Na figura 3.4. são apresentadas duas curvas de adsorção de fósforo em solos. Note-se que maior parte do elemento passa para a fase sólida. A capacidade de adsorção máxima de fósforo dos solos é muito grande, ultrapassando em muito as quantidades que são relevantes na prática da adubação fosfatada.

Quando se coloca uma solução com fosfato solúvel em água em contacto com solo, como foi feito para preparar a figura 3.4., a parte do fosfato que passou para a fase sólida tem sido chamada de «fósforo fixado». Isto não dá uma idéia completa do problema. Os fosfatos que reagem com o solo não formam imediatamente ligações muito estáveis, permanecendo por bastante tempo, até por muitos anos, em uma forma lábil, que pode retornar para a solução. Estabelece-se o seguinte equilíbrio:

$$\text{P solução} \rightleftharpoons \text{P lábil} \rightarrow \text{P não lábil} \qquad (3.4)$$

Se houver remoção do fósforo da solução, o fósforo lábil dissolve e os níveis da solução são restituídos para manter o equilíbrio. Com o tempo, a quantidade de fosfato lábil vai gradativamente transformando-se em fosfato não lábil, tornando o elemento não-disponível ou dificilmente disponível.

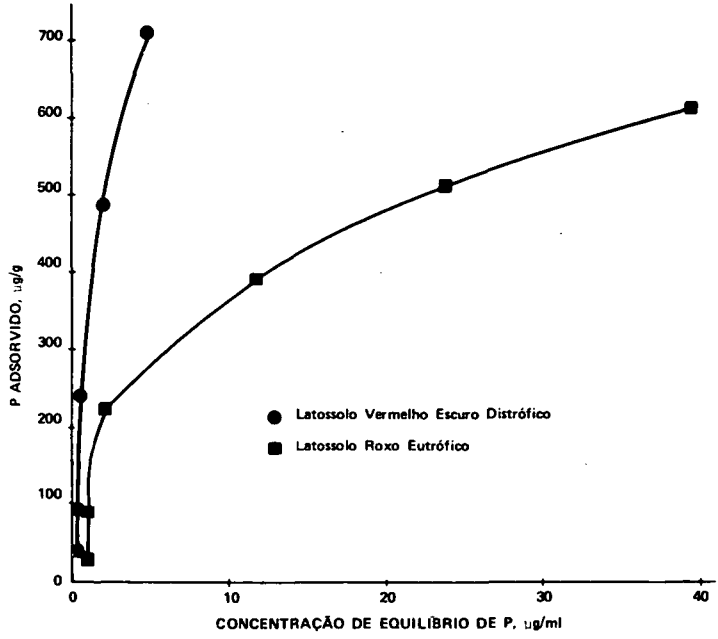

Figura 3.4. Curvas de adsorção de fósforo em dois solos do Estado do Paraná. As determinações foram feitas com suspensões de 5g de terra e 50ml de solução. Fonte: Lourenço, S. Adsorção e dessorção de fósforo em solos do Estado do Paraná. Tese de doutoramento. ESALQ, 1973.

De qualquer forma a idéia de «fixação» de fósforo em solos é válida e o problema é muito sério, devendo-se, porém, manter em mente a idéia de que a imobilização de fosfatos solúveis adicionados a solos em formas não disponíveis, não ocorre instantaneamente.

As condições que favorecem maiores índices de imobilização a formas não disponíveis, dos fosfatos adicionados aos solos, são maiores teores de argila, maior ocorrência na argila de óxidos de ferro e alumínio e menores valores de pH. Em solos de pH elevado, o aumento de pH e a alta saturação de cálcio são os principais fatores.

3.6. **Processos biológicos envolvendo nitrogênio**

O nitrogênio ocorre nos solos principalmente em combinações orgânicas. Contudo, são as formas inorgânicas que são disponíveis para os vegetais e, portanto, transformações de formas orgânicas a inorgânicas e vice-versa, são de grande importância.

Dois processos, denominados de uma forma genérica de mineralização e imobilização, afetam o nitrogênio do solo. A mineralização consiste na transformação do nitrogênio orgânico em formas minerais, enquanto que a imobilização consiste na passagem do nitrogênio mineral para formas orgânicas. Os dois processos podem ocorrer simultaneamente.

Pela mineralização a matéria orgânica do solo, húmus e especialmente restos orgânicos de origem mais recente, são decompostos com a liberação de gás carbônico e formas minerais de nitrogênio, de enxofre e de fósforo. A liberação de nitrogênio é favorecida por valores baixos da relação C/N da matéria orgânica.

A imobilização de nitrogênio consiste na incorporação de nitrogênio na forma mineral ao protoplasma dos microorganismos. O processo é favorecido em solos com relação C/N muito acima daquela encontrada em solos cultivados bem drenados, que se situa em torno de 10, ou quando são incorporados ao solo restos orgânicos frescos de relação C/N elevada.

A mineralização do nitrogênio orgânico processa-se por diversas etapas e as reações, promovidas por microorganismos, culminam com a formação de nitrato. Maiores detalhes são dados nos livros de Russell (1978), Tisdale e Nelson (1975), Mengel e Kirkby (1978) e de Malavolta (1976).

O primeiro passo na decomposição de compostos orgânicos nitrogenados é a aminização que é promovida por microorganismos heterotróficos, ou seja, que necessitam de carbono orgânico como fonte de energia. A reação pode ser representada por:

$$\text{N} - \text{orgânico} \rightarrow \text{R} - \text{NH}_2 + \text{CO}_2 + \text{outros produtos} + \text{energia} \qquad (3.5)$$

A reação prossegue através da amonificação, promovida por outras bactérias heterotróficas:

$$R - NH_2 + H_2O \rightarrow NH_3 + R\text{-}OH + \text{energia} \quad (3.6)$$

A amônia formada, em combinação com água, fornece o íon amônio ($NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$), que é passível de ser absorvido pelas plantas, porém em geral é quase todo convertido em nitrato, pelas seguintes reações:

$$2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+ \quad (3.7)$$

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^- \quad (3.8)$$

O processo é efetuado por bactérias autotróficas, que obtém energia da oxidação de sais inorgânicos e usam CO_2 como fonte de carbono. A conversão de NH_4^+ a NO_2^- tem a intervenção de bactérias do gênero *Nitrosomonas*, enquanto que a passagem de NO_2^- a NO_3^- é promovida por bactérias do gênero *Nitrobacter*. O nitrito, NO_2^-, é um componente intermediário, muito tóxico aos vegetais, mas em geral de permanência efêmera no solo, sendo logo convertido a nitrato, NO_3^-.

Uma reação muito importante é a denitrificação, que ocorre durante a decomposição anaeróbica de restos vegetais em solos. Nessas condições, o nitrogênio existente como nitrato é reduzido a óxido nitroso, N_2O, ou a nitrogênio, N_2, ambos gases que se perdem para a atmosfera. A denitrificação tem lugar em condições de excesso de umidade no solo e, consequentemente, falta de oxigênio, e em presença de matéria orgânica fresca que serve de fonte de energia para as bactérias responsáveis pelo processo. Ela ocorre com maior intensidade em solos mal drenados, mas pode ocorrer em solos bem drenados em períodos chuvosos, quando podem ocorrer pontos localizados em condições anaeróbicas.

4. CONCEITOS

O estudo das adubações é feito com material biológico e, portanto, sujeito às influências dos inúmeros fatores que afetam o desenvolvimento dos seres vivos. Assim, não se pode pretender equacionar rigorosamente os fatores de produção para controle e previsão desta.

Não obstante isto, há muito que pode ser compreendido, e por vezes quantificado, com o auxílio de conceitos desenvolvidos desde o século passado. Os conceitos, que serão descritos suscintamente a seguir, devem ser sempre lembrados, pois, os fatos a que eles se referem são reais, mesmo que nem sempre seja fácil isolar as suas consequências.

Neste capítulo já inicia-se um tipo de apresentação que será mais utilizado nos capítulos seguintes. Trata-se de avaliar efeitos de nutrientes através da resposta que eles provocam nas produções de culturas. Quando se fala em nutrientes, duas fontes devem ser consideradas: o solo e o fertilizante. Quase tudo que se discute em avaliação da fertilidade do solo gira em torno do nutriente no solo, do nutriente aplicado como fertilizante e da resposta de culturas aos nutrientes do solo e/ou aplicados.

4.1. Absorção e disponibilidade de nutrientes

A absorção de nutrientes do solo pelas raízes dá-se por três processos: intercepção radicular, fluxo de massa e difusão (Barber e Olson, 1968; Corey, 1973).

O sistema radicular, ao desenvolver-se, encontra-se com os nutrientes, que podem ser absorvidos pelo processo de intercepção radicular. A água está constantemente sendo absorvida, movendo-se para

a superfície das raízes e penetrando nela, arrastando diversos solutos, que são absorvidos pelo processo do fluxo de massa. Finalmente, por causa da absorção de nutrientes cria-se um gradiente de concentração na solução do solo próximo da superfície das raízes, com teores mais baixos próximo e mais altos distante dela, ocasionando o movimento por difusão dos nutrientes para a raiz.

Um exemplo da importância de cada um dos três processos é dado na tabela 4.1., para os seis macronutrientes. Note-se de imediato as grandes diferenças que existem para os seis nutrientes. Muito disto tem a ver com as concentrações dos nutrientes na solução e a sua mobilidade.

Tabela 4.1. Exemplo da importância dos três processos que afetam a absorção de macronutrientes pela cultura do milho

Nutriente	Quantidade necessária para 9200 kg/ha de grãos	Quantidades aproximadas supridas por		
		Intercepção radicular	Fluxo de massa	Difusão
	kg/ha	kg/ha		
Nitrogênio	190	2	188	0
Fósforo	40	1	2	37
Potássio	194	4	39	151
Cálcio	235	67	168	0
Magnésio	129	17	112	0
Enxofre	22	1	21	0

Fonte: Barber e Olson (1968).

O nitrogênio, por ser absorvido principalmente na forma de nitrato, que é uma forma livre não adsorvida ao solo, praticamente acompanha a água que entra na planta, daí porque o fluxo de massa atende quase que completamente às necessidades da cultura. A mesma explicação vale para o enxofre, absorvido na forma de sulfato.

Cálcio e magnésio encontram-se em teores altos na solução do solo. Daí porque a intercepção radicular atende parte considerável da absorção. O fluxo de massa supre a restante, em geral em excesso, de forma que quantidades maiores do que as utilizadas pelo milho atingem as raízes.

O fósforo, pelas baixas concentrações existentes em solução, chega às raízes principalmente pelo mecanismo da difusão. O mesmo acontece com o potássio mas, neste caso, as concentrações na solução

do solo são maiores e a mobilidade do elemento, embora baixa, é maior que a de fosfatos, principalmente se os teores de sais da solução do solo forem consideráveis, o que permite parte do potássio ficar em solução, neutralizando os co-íons, escapando assim da atração direta das cargas negativas da superfície das partículas.

Disponibilidade de nutrientes é uma expressão nem sempre bem utilizada. Frequentemente ela é associada com os valores fornecidos por métodos de extração química, que as vezes podem extrair de solos os teores disponíveis, porém, com mais freqüência, extraem quantidades que, na melhor das hipóteses, apresentam correlação com o que seriam os teores disponíveis.

É preferível usar a palavra disponível, ao referir-se a um nutriente no solo, como um conceito, que nem sempre pode ser traduzido diretamente em um número. Esta limitação não impede que se utilizem métodos de análise de solo para avaliar a disponibilidade dos nutrientes, como será visto posteriormente.

O teor disponível de um nutriente em uma determinada condição depende, além das formas em que o mesmo se encontra no solo, da capacidade de absorção da cultura, do desenvolvimento do sistema radicular, do tempo de crescimento e, freqüentemente, de condições climáticas e da disponibilidade de outros nutrientes.

Mais especificamente, pode-se considerar como disponível aquela parte do nutriente que encontra-se na solução do solo, juntamente com uma parte do nutriente da fase sólida que pode passar para a solução. A concentração em solução é chamada de fator atividade, indicando a parte do nutriente imediatamente disponível. A parte na fase sólida é chamada fator quantidade, superando em geral largamente os teores em solução.

Os nutrientes que estão no solo como catíons trocáveis, como é o caso de cálcio, magnésio e potássio, apresentam um equilíbrio entre os teores em solução e os teores trocáveis adsorvidos na fase sólida e que representam o fator quantidade, o que facilita muito o seu estudo. No caso do fósforo, também existe tal equilíbrio, mas há muita dificuldade em determinar com precisão o que seria o fósforo disponível. No caso de nitrogênio, e em parte também enxofre, o teor em solução pode ser considerado o fator atividade, que pode ser determinado sem muitas dificuldades. Porém, o fator quantidade, representado por aquela parte dos nutrientes em formas orgânicas que pode mineralizar-se, é de difícil determinação, além de não estar em equilíbrio com as formas minerais.

4.2. **Curvas de resposta**

Curvas de resposta são de fundamental importância em es-

tudos de fertilidade do solo. Há várias maneiras de se obtê-las, a mais simples sendo aquela em que se determina como a produção de uma cultura varia com o incremento de um nutriente adicionado ao solo. Sempre que possível, as curvas de resposta para adição de nutrientes deveriam ser conhecidas. É um avanço sobre a idéia mais simples, de um nutriente adicionado ao solo proporcionar ou não uma resposta em termos de aumento de produção.

Na figura 4.1. é apresentada uma curva de resposta modelo, que mostra alguns dos aspectos importantes que devem ser mantidos em vista. Normalmente uma curva de resposta deve ser obtida experimentalmente em condições em que outros fatores limitantes são minimizados, principalmente aqueles que podem ser facilmente controlados.

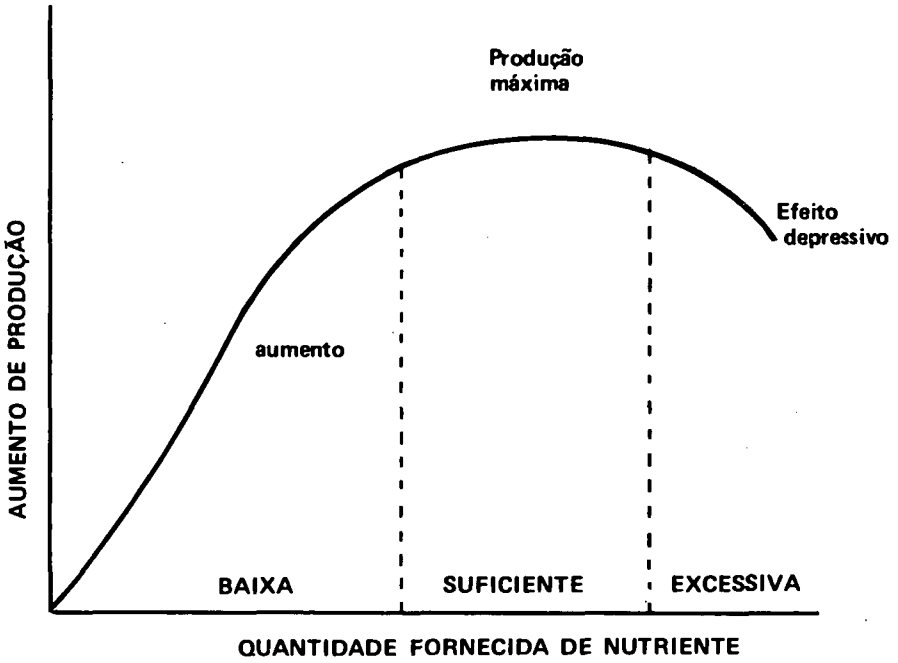

Figura 4.1. Curva de resposta esquemática para a aplicação de um nutriente.

A figura 4.1. mostra uma situação em que a curva de resposta passa por todos os estágios, de aumento, de suficiência e de efeito depressivo. Na prática, as curvas de resposta podem iniciar em qualquer ponto, por existirem nos solos quantidades variáveis de nutrientes. Assim, tanto podem ser obtidos aumentos de produção consideráveis, co-

mo pode não haver influência na produção ou, ocasionalmente, o nutriente aplicado pode ter efeito depressivo.

É, pois, de grande importância tentar avaliar a fertilidade do solo, a fim de obter o máximo retorno dos nutrientes aplicados e, também, evitar aplicações elevadas onde elas se fazem desnecessárias ou onde podem ter efeito depressivo, causando duplo prejuízo, o do gasto com o nutriente e o da perda de produção.

As curvas da figura 4.2. exemplificam bem a diversidade de aspectos que curvas de resposta a fertilizantes podem apresentar na prática da adubação.

Freqüentemente há interesse em estudar dois nutrientes ou fatores em conjunto, principalmente quando o efeito de um influencia o efeito do outro. Nesses casos obtém-se, se os resultados forem apresentados graficamente, as chamadas superfícies de resposta. Também podem ser obtidas relações entre diversos níveis de nutrientes aplicados e a produção, que são expressas matematicamente através de funções de resposta.

Contudo, em muitos casos as simples curvas de resposta exprimem suficientemente os fatos, não havendo então necessidade de recorrer a modelos mais complexos, que podem ser reservados para estudos em que forem indispensáveis.

4.3. **A lei do mínimo**

A lei do mínimo, formulada pelo químico alemão Justus von Liebig na primeira metade do século passado, influenciou sobremaneira o desenvolvimento e o pensamento relacionados com adubação e nutrição de culturas (Malavolta, 1976; Russell, 1973).

Segundo essa lei, o crescimento da planta é limitado por aquele nutriente que ocorre em menores proporções e ele seria o único a limitar a produção.

A chamada lei do mínimo tem, na realidade, uma aplicação limitada. Em casos em que vários fatores limitam a produção, porém não excessivamente, o aumento de qualquer um deles levará a aumentos de produção. Além disso, o comportamento dos nutrientes difere, como será visto no ítem 4.6., dos nutrientes móveis aproximando-se mais do que seria de esperar pela aplicação da lei do mínimo.

Embora a lei do mínimo não possa ser aplicada rigorosamente, e hoje ela não é considerada uma «lei», a sua idéia básica não deve ser perdida de vista. Se existe um fator limitante sério ao crescimento, e isto vale para outros fatores além de nutrientes, a correção de um outro fator em deficiência pode não produzir o efeito desejado enquanto o primeiro não for corrigido.

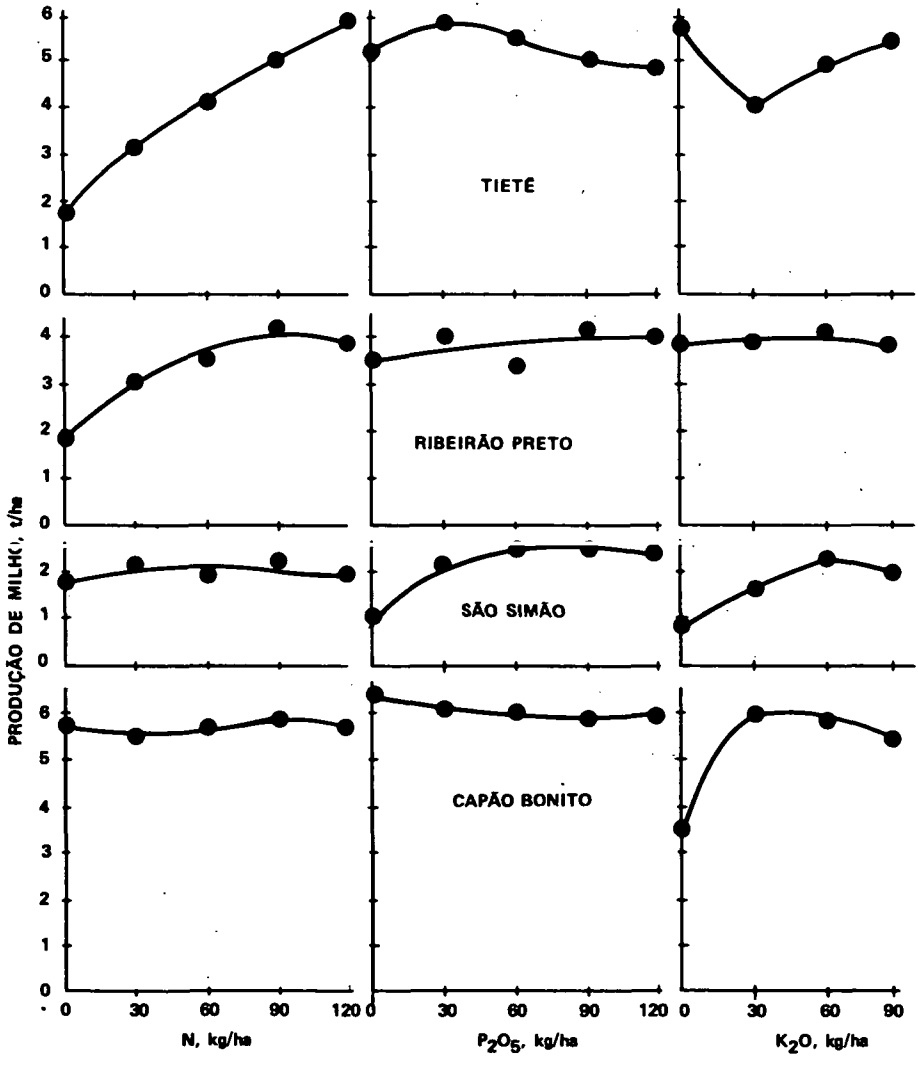

Figura 4.2. Curvas de resposta selecionadas, para aumentos de produção de milho a aplicações de nitrogênio, fósforo e potássio.
Fonte: Raij B. van et al. 1981. (Submetido para publicação em Bragantia).

4.4. A lei dos incrementos decrescentes

Ela foi desenvolvida por E.A. Mitscherlich na primeira década deste século. Tal como a lei do mínimo, a lei dos retornos decrescentes não é uma «lei natural», devendo ser considerada como uma expressão matemática de crescimento, que aplica-se bem a muitos casos de resultados experimentais de curvas de resposta. Detalhes e referências de muitos trabalhos relacionados a este importante assunto são dados nos livros de Malavolta (1976), Mengel e Kirkby (1978) e Tisdale e Nelson (1975).

Mitscherlich desenvolveu um grande número de trabalhos experimentais em vasos e no campo, testando quantidades crescentes de um nutriente de cada vez. Verificou que, ao adicionar quantidades sucessivas de um nutriente, o maior incremento em produção era obtido com a primeira quantidade aplicada. Com aplicações sucessivas de quantidades iguais do nutriente, os incrementos de produção são cada vez menores, conforme está ilustrado na figura 4.3.

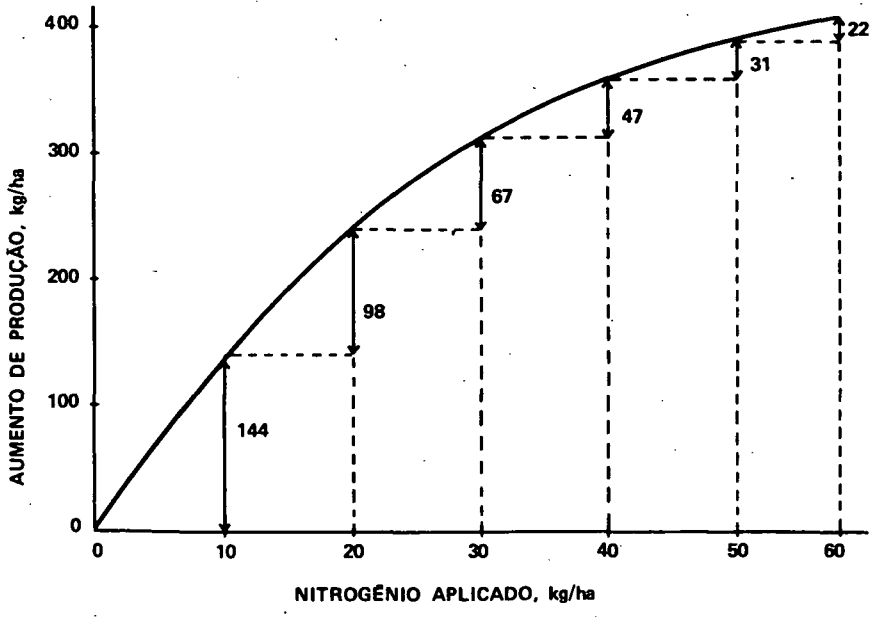

Figura 4.3. Curva de resposta de algodão a nitrogênio, mostrando-se os incrementos decrescentes de produção para aumentos sucessivos de 10 kg/ha na dose do nutriente. Curva construída com resultados médios de 15 ensaios conduzidos em latossolo roxo. A produção média sem nitrogênio foi de 1790 kg/ha de algodão em caroço.
Fonte: Para a construção da figura foram utilizados resultados publicados por Silva, N.M. Instituto Agronômico. Boletim n.º 8 do projeto BNDE/ANDA/CIA, 1971.

Para o desenvolvimento matemático foi considerado que a produção atinge um máximo e que o aumento em produção proporcionado por uma unidade de fator de crescimento (ou quantidade de nutriente), era proporcional à quantidade de produção ainda necessária para atingir a produção máxima.

Isto foi expresso pela equação:

$$\frac{dy}{dx} = k(A - y) \qquad (4.1)$$

onde y é a produção, x é a quantidade de nutriente, A é a produção máxima e k é uma constante.

Integrando-se a equação 4.1. e desenvolvendo, chega-se à forma logarítmica da equação de Mitscherlich, que é:

$$\log(A - y) = \log A - cx \qquad (4.2)$$

A forma exponencial da mesma equação, também bastante utilizada, é a seguinte:

$$y = A(1 - 10^{-cx}) \qquad (4.3)$$

Mitscherlich considerou que c, chamado de coeficiente de eficácia, teria uma importância fundamental, tendo um valor constante para cada um dos três macronutrientes primários. Tal não é, porém, o caso e o valor de c varia de acordo com condições experimentais (Mengel & Kirkby, 1978; Igue e outros, 1971).

A equação de Mitscherlich assume um comportamento assintótico, isto é, a produção aproxima-se da produção máxima A quando x aumenta. Na prática da adubação, porém, não são raros os efeitos depressivos de doses elevadas de fertilizantes, o que está de acordo com o exposto na figura 4.1. e em algumas curvas da figura 4.2. Quando isto ocorre, é mais conveniente o uso do trinômio do 2.º grau.

$$y = a + bx + cx^2 \qquad (4.4.)$$

Esta equação tem a vantagem de ser de aplicação bem mais simples. Polinômios de grau mais elevado podem também ser utilizados, contudo, raramente há vantagens em seu uso.

Na figura 4.4. é dado um exemplo do ajuste da equação de Mitscherlich e do trinômio do 2.º grau a uma curva de resposta de cana-de-açúcar a fósforo. Nenhuma das duas curvas ajusta-se perfeitamente aos dados experimentais. Contudo, para fins práticos, as duas equações podem ser utilizadas, desde que sejam evitados os extremos superiores, principalmente no caso do trinômio do 2.º grau. Extrapolações devem ser sempre evitadas ao utilizar esta equação.

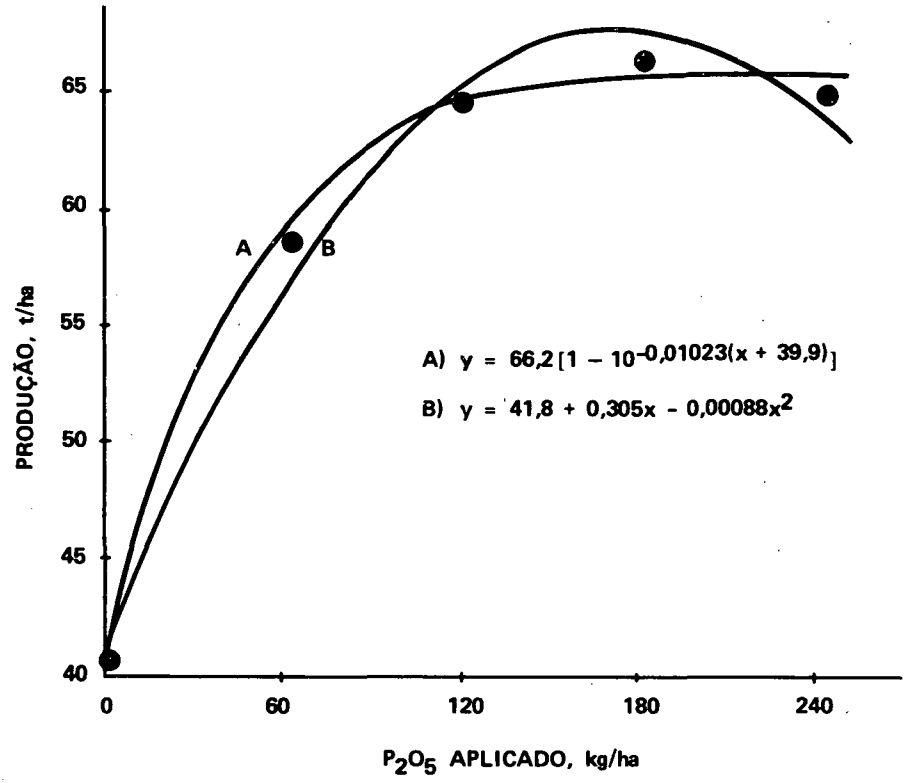

Figura 4.4. Comparação do trinômio do 2.° grau e da equação de Mitscherlich, ajustados a uma curva de resposta da cana-de-açúcar a fósforo.
Fonte: A equação de Mitscherlich e os dados experimentais foram publicados por Alvarez, R. et al. **Bragantia 16:297-302, 1957.**

4.5. O conceito da porcentagem de suficiência

O conceito da porcentagem de suficiência é de grande interesse prático para a calibração de resultados de análise de solo, como será mostrado posteriormente. A porcentagem de suficiência é também chamada de produção relativa ou rendimento relativo. Da maneira mais simples, ela é calculada por:

$$\text{Produção relativa} = \frac{\text{Produção sem o nutriente}}{\text{Produção com o nutriente}} \qquad (4.5)$$

Uma regra para experiências de adubação que aplica-se em quase todos os casos, e, especialmente neste, é que não deve haver outros fatores limitantes, dentro do que for possível evitar, a fim de que somente a resposta ao nutriente em questão seja avaliada. Portanto, a produção relativa para um determinado nutriente, é calculada para condições adequadas de pH e de suprimento dos demais nutrientes.

No caso de existirem curvas de resposta, a produção relativa é calculada com base nas produções mínimas e máximas calculadas pela equação ajustada aos resultados experimentais.

O conceito da porcentagem de suficiência foi desenvolvido por Baule (vide detalhes em Tisdale e Nelson, 1975). Segundo esse conceito, a produção final é o produto dos fatores envolvidos e não a resultante de um fator mínimo, como seria o caso se a lei do mínimo se aplicasse. Assim, se dois nutrientes existentes no solo tiverem o potencial para produzirem determinadas porcentagens da produção máxima, a produção final, se eles não forem aplicados, será o produto das porcentagens individuais.

Infelizmente esse conceito não teve ainda no Brasil a atenção devida. Como nos casos das leis do mínimo e dos incrementos decrescentes, não se deve esperar neste caso uma aplicação rigorosa do conceito da porcentagem de suficiência. Mas, trabalhar em torno de conceitos é sempre muito melhor do que tentar interpretar fatos sem conceito nenhum.

Pode-se especular em torno das conseqüências do conceito da porcentagem de suficiência, com algum suporte em estudos em fase inicial deste autor. Suponha-se um caso em que as condições de acidez permitam a obtenção de 85% da produção máxima, o teor de fósforo 85% também, e o teor de potássio 90%. Essas diferenças em relação a 100% não são em geral detectáveis nos experimentos de adubação, aplicando-se análise estatística usual na interpretação dos resultados. Não obstante isto, se o conceito de porcentagem de suficiência for válido, a produção esperada sem a aplicação de calagem, de fósforo e de potássio, será de 0,85 x 0,85 x 0,90, ou apenas 65% do máximo.

4.6. **A mobilidade dos nutrientes**

A mobilidade dos nutrientes no solo tem implicações diretas no mecanismo de absorção pelas plantas e reflete-se nas práticas de adubação. Se for considerado que as raízes ocupam em torno de 1% do volume do solo, é fácil concluir que, no caso dos nutrientes de baixa mobilidade, a absorção pelas plantas será mais difícil, dependendo mais de mecanismos de difusão, como é o caso de fósforo e de potássio (tabela 4.1.).

Os conceitos sobre mobilidade dos nutrientes, desenvolvidos por Bray (1948), tentam conciliar a lei do mínimo com os conceitos de porcentagem de suficiência.

Os nutrientes relativamente imóveis, como fósforo, potássio, cálcio e magnésio, teriam um comportamento mais relacionado com o conceito de porcentagem de suficiência. Já nutrientes móveis, como nitrogênio-nítrico e água (Bray incluiu água como nutriente, em suas considerações), teriam um comportamento mais de acordo com a lei do mínimo.

Do ponto de vista de fertilidade do solo, são marcantes as diferenças de comportamento dos nutrientes relativamente imóveis e dos relativamente móveis.

No caso dos nutrientes imóveis, principalmente fósforo e em menor intensidade o potássio, por causa da baixa mobilidade associada ao fato de apenas uma pequena parte do volume total do solo ser influenciado pelas raízes, apenas uma parte dos nutrientes existentes em forma disponível é absorvida. Isto significa que, mesmo em condições de deficiência, existem no solo quantidades bem maiores dos nutrientes do que as plantas necessitam. Diz-se, por essa razão, que os nutrientes imóveis tem uma disponibilidade elástica. Os argumentos expostos esclarecem também porque a porcentagem de suficiência ou produção relativa é pouco afetada por condições climáticas. Havendo condições mais favoráveis de clima, haverá maior desenvolvimento do sistema radicular porém, *como a absorção por unidade de volume de raízes é insuficiente*, o grau de deficiência continuará, só que dentro de produtividades mais elevadas.

Na realidade apenas o fósforo enquadra-se muito bem no conceito do nutriente imóvel, principalmente por causa das baixas concentrações do elemento que existem na solução do solo. Potássio, cálcio e magnésio, se forem considerados apenas os teores trocáveis, deveriam ter, também, baixa mobilidade. Como ocorrem sais na solução do solo, e deles participam os catíons, haverá sempre uma certa mobilidade, que será maior se maior for a concentração dos co-íons em solução. Os micronutrientes zinco, cobre, manganês, ferro são também de baixa mobilidade no solo.

Os nutrientes móveis, com destaque para nitrogênio-nítrico (e água, segundo Bray), incluindo ainda com uma mobilidade relativa menor, o enxofre como sulfato e o boro, movimentam-se com maior liberdade no solo. Isto faz com que praticamente todo o teor disponível possa ser absorvido. Diz-se que os nutrientes móveis tem uma disponibilidade pouco elástica. Uma vez esgotado a maior parte do nutriente móvel, ou da água, a planta sofre severa deficiência e a limitação ao crescimento é crítica, dentro do que se esperaria se fosse aplicada a lei do mínimo.

O caso do nitrogênio é o mais importante, e severas quedas de produção são por vezes constatadas em sua deficiência. Os problemas são mais sérios em solos onde o suprimento de nitrogênio por mineralização da matéria orgânica é baixo.

A baixa elasticidade da disponibilidade de nitrogênio-nítrico e água em solos tem uma importante conseqüência em casos de competição de ervas daninhas, que se faz sentir com maior intensidade nesses casos, sendo de menor importância para nutrientes pouco móveis e com disponibilidade mais elástica.

4.7. Interações dos fatores de produção

A adubação não é uma prática que pode ser considerada isoladamente. Ela deve ser considerada com relação a outras práticas que também afetam a produção e, portanto, levam a uma maior necessidade de nutrientes. São exemplos a calagem, a irrigação, o uso de variedades mais produtivas, um manejo mais eficiente do solo, etc. É muito importante conhecer-se as interações mais importantes que podem ocorrer entre os fatores de produção.

Podem ocorrer interações, positivas ou negativas, para nutrientes aplicados. Um exemplo extremo seria o caso de um solo com deficiências extremas de dois nutrientes. A adição de cada um deles isoladamente pouco afetaria a produção, contudo, se os dois forem adicionados o efeito deverá ser grande. Diz-se que ocorre uma interação positiva entre o efeito dos dois nutrientes, por ser o efeito dos dois em conjunto maior do que a soma dos efeitos isolados de cada um.

As interações de nutrientes aplicados em solos podem-se manifestar de diversas maneiras, embora em geral os efeitos isolados dos nutrientes sejam mais importantes. Isto foi mostrado por Campos e Gomes (1976) para 117 experimentos fatoriais de milho conduzidos nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, nos quais as interações foram de importância secundária e de pequena monta se comparados com os efeitos principais dos nutrientes.

Dois tipos de interação envolvendo adubação são de enorme importância na agricultura moderna. Uma delas é a interação da irrigação com a adubação e a outra é a interação de variedades mais produtivas com a adubação. Em ambos casos, quer pelo uso da irrigação, quando ela se faz necessária, quer pelo emprego de variedades de maior potencial genético, podem ser conseguidas produtividades bem mais elevadas, o que eleva a demanda de nutrientes. Invertendo o raciocínio, os benefícios da irrigação e do uso de variedades de alto potencial de produção só podem se manifestar se houver disponibilidade suficiente de nutrientes.

Um exemplo do efeito da qualidade do material genético na produtividade, com diferentes populações de milho, é dado na figura 4.5. No caso, o milho híbrido produziu cerca de 1,1 t/ha a mais sem adubo do que o milho cateto, na produção de 50.000 plantas por hectare. Com a dose 2 de fertilizante, a diferença passou para 1,8 t/ha, além da produtividade ser muito maior. Note-se a boa produção obtida como média de 32 ensaios, isto há 20 anos passados. Outras conclusões sobre adubação, efeito varietal e do espaçamento, podem ser tiradas da figura.

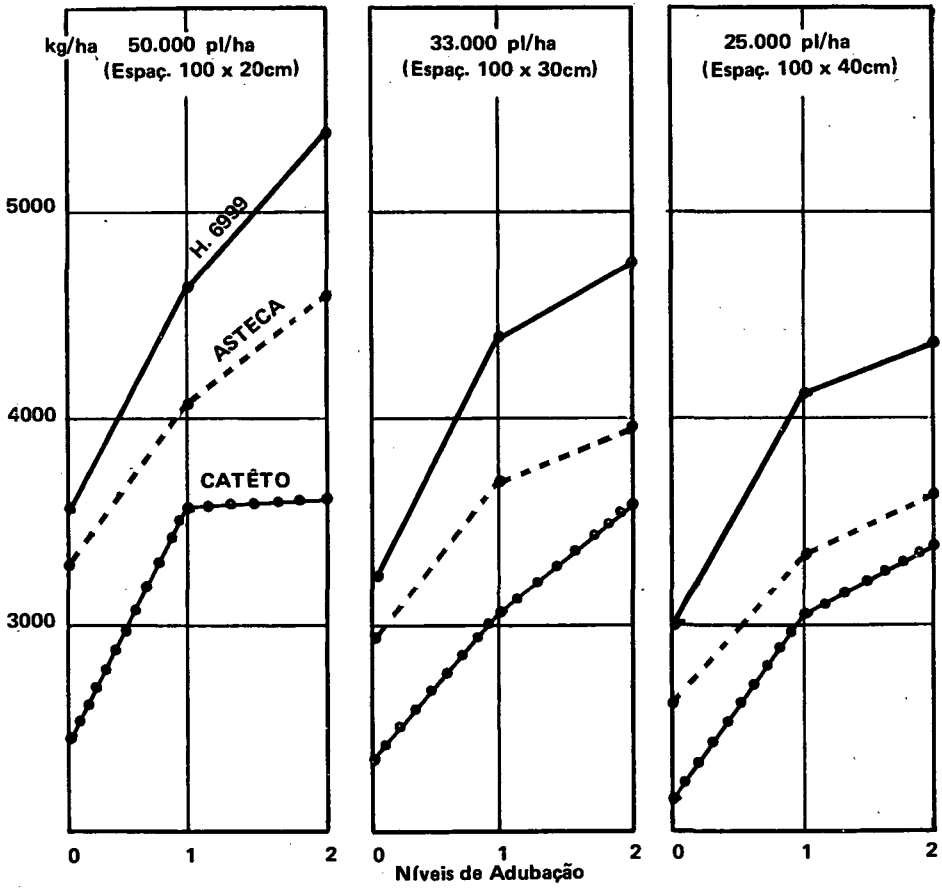

Figura 4.5. Produções médias de milho em grão das variedades Cateto, Asteca e do híbrido duplo semidentado H. 6999, obtidas em parcelas com diferentes densidades de plantio, correspondentes a 50, 33 e 25 mil plantas por hectare e nos níveis 0, 1 e 2 de adubação. Resultados médios de 32 ensaios colhidos em 1960, em vários pontos do Estado de São Paulo.
Fonte: Viégas, G.P. et al. Bragantia 22: 201-236, 1963.

4.8. Doses mais econômicas de fertilizantes

A chamada lei dos incrementos decrescentes, ilustrada na figura 4.3., serve de base para a conceituação da dose mais econômica. A cada quantidade de nutriente adicionada sucessivamente corresponde um incremento de produção cada vez menor. Quando o valor do incremento em produção é exatamente igual ao custo do nutriente, atinge-se um nível de aplicação acima do qual a adubação dá prejuízo, nível este correspondente à chamada dose mais econômica de fertilizante.

Na figura 4.6. é ilustrada a determinação da dose mais econômica, correspondente à dose de nutriente que proporciona a máxima distância entre a linha de custo do insumo e a curva de resposta. Os dados podem ser colocados na figura em seu valor monetário ou com os valores em termos de produto.

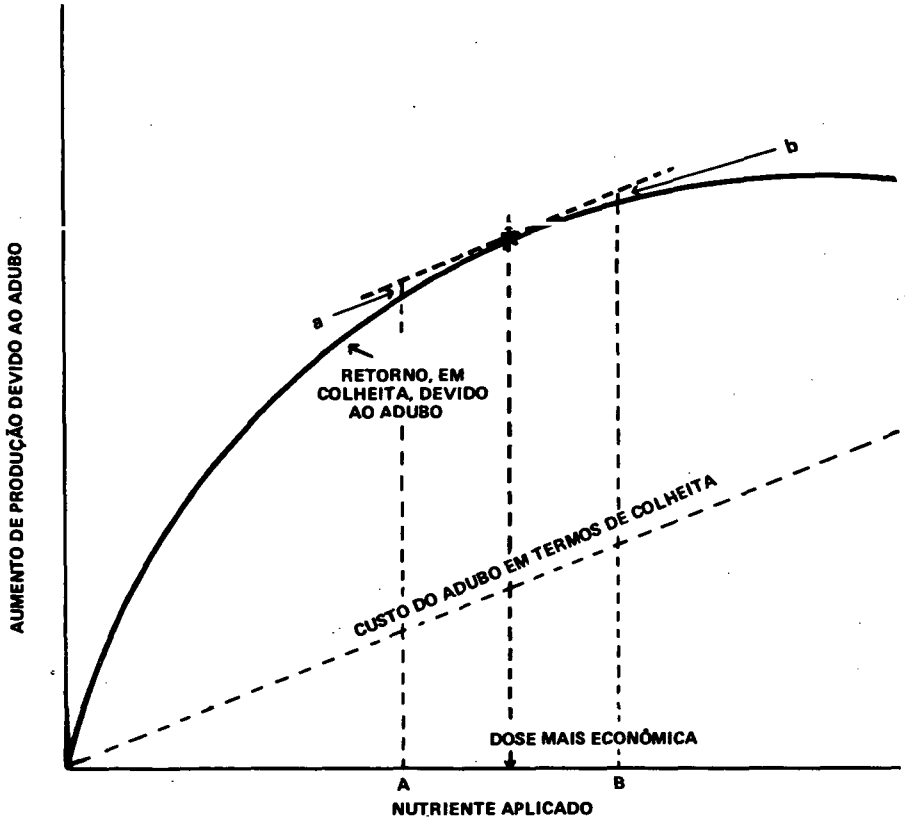

Figura 4.6. Ilustração gráfica do conceito de dose mais econômica. Note-se que uma variação de 25% para mais ou para menos teria pequena conseqüência prática, com «prejuízos» representados por a e b.

É importante salientar que a determinação da dose mais econômica não é, em geral, de muita sensibilidade, admitindo-se uma variação para mais ou para menos sem grandes conseqüências práticas. Na figura 4.6. é mostrado o que aconteceria para aplicações de nutrientes em dosagens A ou B, ao invés da dose mais econômica. Os «prejuízos», indicados por a e b, são insignificantes. Isto não deixa de ser tranquilizador para o técnico que necessita recomendar adubação, que tem assim uma margem de segurança, bastante útil, considerando-se as incertezas relacionadas com produções futuras e custo unitário do produto, que precisam ser conhecidos para os cálculos de doses mais econômicas.

A dose mais econômica tem sido calculada no Brasil pelo uso da equação de Mitscherlich, ou através do trinômio do 2.º grau (ANDA, 1975). No caso da equação de Mitscherlich, se os valores do coeficiente de eficácia, c (equações 4.2. e 4.3.), forem calculados para cada caso, já que eles variam bastante de um experimento para outro, as doses mais econômicas calculadas das duas maneiras aproximam-se bastante (Igue e outros, 1971).

O trinômio do 2.º grau freqüentemente ajusta-se bem a curvas de resposta, principalmente se forem evitadas doses muito elevadas, não se devendo extrapolar valores para fora dos limites dos dados experimentais disponíveis.

Tem sido freqüente a publicação, em trabalhos que tratam da determinação de doses mais econômicas, de tabelas que apresentam os valores para diferentes relações de preços de nutrientes e produtos, procurando incluir as possíveis variações que se pode esperar nessas relações. Quando se utiliza a regressão pelo trinômio do 2.º grau, é possível construir um gráfico que permite obter diretamente a dose mais econômica.

A figura 4.7. mostra a seqüência do procedimento. Inicialmente deve-se ter a curva de resposta, com a equação do 2.º grau ajustada aos dados experimentais (A). Constroi-se um outro gráfico, desta vez com a derivada da equação do 2.º grau (B). Na abcissa do lado direito do gráfico, representa-se a eficiência fertilizante, expressa em quilograma de produto por quilograma de nutriente. Do lado direito, com a mesma escala é representada a relação entre preço unitário do nutriente e o preço unitário do produto. Para encontrar a dose mais econômica, para uma determinada relação de preços, basta entrar no gráfico conforme indicado pelas setas na figura 4.7.B.

A dose mais econômica é uma informação valiosa para equacionar problemas de adubação, mas ela não deve ser considerada isoladamente. Não deve ser esquecido que ela em geral refere-se aos dados de uma única colheita, mesmo em se tratando de médias de muitos ensaios, não levando em consideração os efeitos das adubações a longo

prazo. O conceito de dose econômica é imediatista, principalmente para respostas pequenas, conduzindo ao máximo lucro a curto prazo, mas freqüentemente às custas da fertilidade do solo, podendo levar a diminuição da produtividade a longo prazo. Nos capítulos seguintes será discutido como esses inconvenientes podem ser evitados.

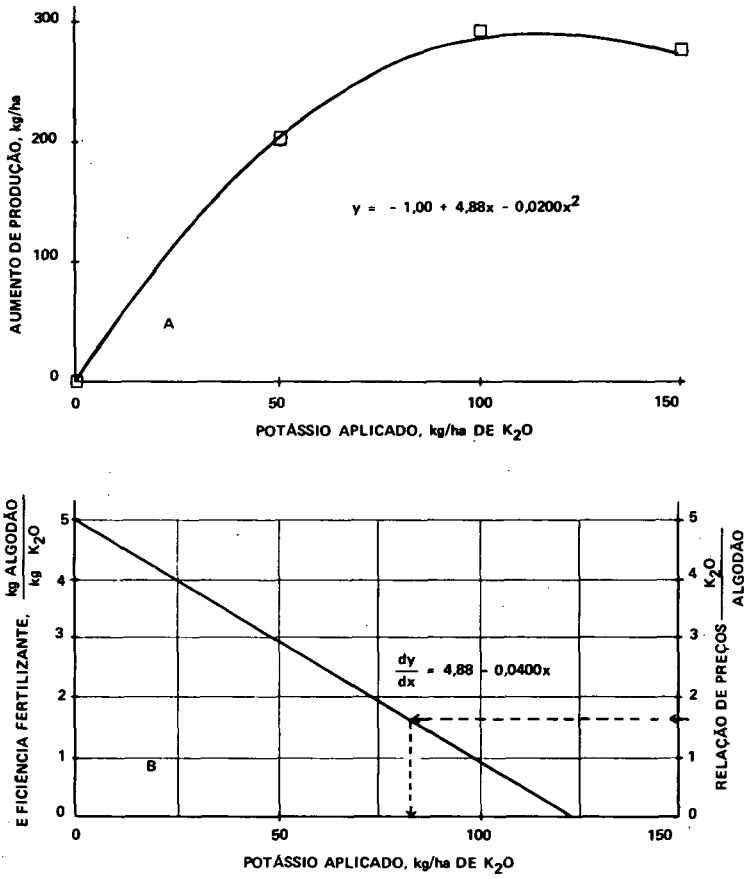

Figura 4.7.A. Curva de resposta de algodão, obtida em 15 ensaios conduzidos em latossolo roxo, com ajuste do trinômio do 2.º grau. B - Eficiência fertilizante de K_2O, em termos de kg de algodão obtidos por kg de K_2O, ou relação de preços, para os mesmos ensaios. As setas indicam um exemplo de como pode ser determinada graficamente a dose mais econômica.
Fonte: Os resultados de produção utilizados nos cálculos foram publicados por Silva, N.M. Instituto Agronômico, Boletim n.º 8 do projeto BNDE/ANDA/CIA, 1971.

5. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO E ESTABELECIMENTO DE NÍVEIS DE ADUBAÇÃO

Com as técnicas de avaliação da fertilidade do solo procura-se identificar condições desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal, tais como acidez excessiva, ou deficiência de nutrientes.

Segundo Bray (1948), um solo fértil é aquele que tem reservas grandes, em condições adequadas de disponibilidade, dos nutrientes vegetais, exceto nitrogênio (e água). Será visto no transcorrer deste e dos demais capítulos que é possível avaliar com bastante segurança a fertilidade do solo no que se refere a fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

A melhor forma de avaliar a fertilidade de um solo consiste na condução de um experimento de adubação, perfeitamente planejado para dar as respostas desejadas. Experimentos de adubação são complexos e de execução cara e, portanto, são principalmente conduzidos por órgãos governamentais. Muito importante é a generalização das informações obtidas para outras áreas. Para isto são usados conhecimentos de solos e plantas, principalmente a análise de solo e, em menor escala, a análise de folhas.

Neste capítulo será explicado como é feita a transferência de informações sobre experimentos de adubação, utilizando a análise de solo, e como as diferentes técnicas de avaliação da fertilidade do solo são empregadas para diagnosticar deficiências de nutrientes e quantificar a sua correção.

5.1. Ensaios de adubação com plantas

São a base dos estudos de adubação e a referência para avaliar a fertilidade dos solos. São fundamentais para testar fontes de nu-

trientes e níveis de aplicação, ou para estudar um grande número de aspectos que afetam a eficiência de aplicação.

Os experimentos podem ser realizados em vasos ou em parcelas experimentais em condições de campo. No primeiro caso em geral os resultados não são diretamente extrapoláveis para condições de campo, porém é possível exercer maior controle sobre os fatores de produção e, assim fazendo, elucidar problemas de difícil solução em condições de campo. Além disso, em vasos é possível abordar um maior número de variáveis, muitas vezes como uma primeira etapa, para realizar ensaios de campo posteriores já com conhecimentos adquiridos. Os ensaios de campo fornecem valores de produção que tem relação direta com a agricultura prática. Eles servem para detectar deficiências de nutrientes e efeitos de diferentes tratamentos sobre a produção, ou para quantificar níveis de aplicação de corretivos e nutrientes.

Não cabe aqui entrar em detalhes sobre condução e planejamento de ensaios ou experimentos de adubação, mas tão somente dar alguns exemplos para ilustração.

Na tabela 5.1. é dado um ensaio do tipo exploratório, que teve o objetivo de testar uma possibilidade de deficiência de micronutrientes em solo de cerrado, na região de Brasília, para a cultura do arroz. O solo recebeu aplicação de calagem e de adubação com fósforo, potássio, enxofre e nitrogênio. Testou-se uma mistura completa de micronutrientes e vários tratamentos nos quais um micronutriente de cada vez era omitido. Constatou-se extrema deficiência de zinco. Esses tipos de ensaios, também denominados subtrativos, são muito úteis para detectar qual o nutriente em deficiência no solo. É essencial que os nutrientes não testados sejam fornecidos em quantidades adequadas.

Tabela 5.1. Resultados de produção em ensaio com micronutrientes para arroz, conduzido em solo latossolo vermelho-escuro distrófico de Brasília. Médias de 4 repetições

Tratamento	Produção de arroz
	— — — kg/ha — —
Completo	1170
Menos B	1191
Menos Co	1179
Menos Cu	1156
Menos Fe	1210
Menos Mn	1196
Menos Mo	1188
Menos Zn	118

Fonte: Galvão e outros. R. bras. Ci. Solo 2: 129–132, 1978.

Na tabela 5.2. são apresentados alguns ensaios em que foram obtidas curvas de resposta para nitrogênio, fósforo e potássio, cada nutriente em presença de doses fixas dos outros dois. Os ensaios foram conduzidos em solos bastante férteis, praticamente não apresentando deficiência a nitrogênio e potássio e alguma deficiência de fósforo em três ensaios. Nem por isso, as curvas de resposta deixam de ser importantes, no caso indicando que não há necessidade de adubações elevadas.

Ensaios desse tipo, com muitos níveis em curvas de resposta, são provavelmente adequados para muitas situações em que não são esperadas interações entre nutrientes. Têm a vantagem da simplicidade. Evidentemente em outras condições, as respostas serão diferentes das do exemplo.

Tabela 5.2. Respostas de trigo a nitrogênio, fósforo e potássio em solos do Estado do Paraná. Médias de três repetições

Adubação	Produção de trigo			
$N - P_2O_5 - K_2O$	Cascavel	Maringá	Pato Branco	Cambará
kg/ha	kg/ha			
0 – 0 – 0	1541	1546	879	1583
0 – 120 – 45	2316	1916	1266	2191
25 – 120 – 45	2708	1894	1204	2254
50 – 120 – 45	2408	1608	1346	2167
75 – 120 – 45	2683	1896	1271	2183
100 – 120 – 45	2650	2271	1579	2175
75 – 0 – 45	1733	1316	1300	1529
75 – 40 – 45	2341	1875	1187	2183
75 – 80 – 45	2562	2106	1225	2162
75 – 120 – 45	2683	1896	1271	2183
75 – 160 – 45	2612	2054	1608	2242
75 – 120 – 0	2462	2312	1742	2296
75 – 120 – 15	2625	1966	1383	2279
75 – 120 – 30	2692	2066	1337	2158
75 – 120 – 45	2683	1896	1271	2183
75 – 120 – 60	2675	2267	1321	2179

Fonte: Muzilli e outros. Anais XV Congr. Bras. Ci. Solo, 1975, Soc. Bras. Ci. Solo, Campinas, 1976. p. 239-243.

Nos casos em que interações são esperadas, é mais conveniente utilizar os ensaios fatoriais. Na tabela 5.3. são mostrados resulta-

dos de um ensaio fatorial 5 x 5, no qual são estudados cinco níveis de aplicação de calcário e cinco níveis de aplicação da adubação fosfatada, ambos misturados com o solo. Os resultados evidenciam a interação dos efeitos da calagem com os da adubação fosfatada.

Tabela 5.3. Efeito da calagem e da adubação fosfatada sobre a produtividade da soja, em oxissolo do Rio Grande do Sul

P_2O_5 aplicado	Produção de soja			
	Cálcario aplicado, t/ha			
	0	6,6	13,2	19,8
kg/ha	kg/ha			
0	1203	2000	2044	1925
150	1438	2205	2262	2350
300	1844	2376	2558	2529
450	1984	2652	2822	2815
600	1804	3052	3230	3205

Fonte: Eltz e outros. Agron. Sulriograndense 11:37–44, 1975.

Na tabela 5.4. são apresentados resultados que ilustram a necessidade de avaliar o efeito de certos tratamentos, no caso a calagem, por mais de um ano. No exemplo, a calagem praticamente não seria econômica no primeiro ano ou talvez o retorno em colheita mal desse para cobrir as despesas da calagem. Contudo, os efeitos manifestaram-se com maior intensidade nos anos seguintes. Portanto, o efeito da calagem é típico para ilustrar um caso, em que a condução de um ensaio apenas por um ano agrícola é insuficiente.

Existem muitos outros tipos de ensaios de adubação, mais simples ou mais complexos. Interessam, para a avaliação da fertilidade e estabelecimento de níveis de adubação, aqueles que permitem correlacionar a resposta das culturas à adubação, com teores de nutrientes no solo e, numa etapa subsequente, estabelecer níveis de adubação. Na fase em que se encontra a agricultura brasileira, com níveis de produtividades médias ainda bastante baixas, é possível que interações possam ser ignoradas, podendo-se utilizar esquemas experimentais como os ilustrados na tabela 5.2, que fornecem curvas de resposta por nutriente.

Pode-se perfeitamente utilizar ensaios fatoriais para a mesma finalidade. Mas é conveniente sempre considerar 4 níveis de adubação ou mais por nutriente e, de preferência, ajustar aos dados experimen-

tais uma equação matemática que permita obter a produção em função dos nutrientes aplicados.

Tabela 5.4. Efeito da calagem na produção de milho em solo podzólico vermelho amarelo de Mococa. A calagem foi aplicada apenas uma vez, antes do primeiro plantio. Foram considerados os tratamentos que receberam a adubação 10-60-30, kg/ha e mais 60 kg/ha de N

Calcário aplicado	Produções de milho, para os anos		
	1973/74	1974/75	1975/76
t/ha	kg/ha		
0	3524	4325	2888
3	3966	5416	4803
6	4124	6091	5619
9	4774	6408	6219

Fonte: Camargo, A.P. Níveis de calagem e de adubação nitrogenada e fosfatada para milho. Tese de doutoramento. ESALQ, USP. 1979.

Um tipo de experimento, que cumpre uma finalidade bem específica, é o chamado campo de demonstração. Ele serve para demonstrar ao agricultor a vantagem de usar adubos químicos ou calcário. Para poder atender ao caráter demonstrativo, esses ensaios devem ser simples e com poucos tratamentos e repetições, o que impede sua utilização para calibração de análise de solo, que requer experimentos de boa precisão. Isto não impede que os campos de demonstração, além de seu objetivo de promoção da prática da adubação, que é atingido localmente através da reunião de grupos de agricultores em torno de cada experimento, permita também a obtenção de informações regionais sobre a resposta de culturas a fertilizantes. Uma série muito grande de campos de demonstração foram já conduzidos no País, envolvendo um grande número de organizações locais, nacionais e mesmo internacionais. Um resumo desses ensaios é dado no livro da ANDA (1975).

5.2. Análise estatística de resultados experimentais

O solo varia bastante em suas propriedades, mesmo em distâncias de centímetros. Por esta razão e outras, decorrentes de outros fatores diferenciais do meio ambiente, e do fato dos seres vivos superio-

res nunca serem rigorosamente iguais, uma população de plantas cultivadas apresenta-se heterogênea. Isto implica em existir sempre uma variação devida ao acaso em experimentos.

Uma das grandes funções da estatística experimental consiste em permitir isolar os efeitos dos tratamentos estudados das diferenças que ocorrem devido à variação natural. É a chamada análise de variância. Além de testes para determinar se os efeitos de certos tratamentos foram significativos, existe também maneiras de determinar se diferenças entre valores médios obtidos para tratamentos diferem entre si.

Uma outra grande linha de aplicação da estatística experimental é a análise de regressão, que permite estabelecer a relação matemática entre variáveis, partindo de resultados de experimentos ou de observações da natureza. É o caso, por exemplo, de ajustar o trinômio do 2.º grau a dados experimentais de uma curva de resposta.

Para a aplicação da análise estatística existem exigências que precisam ser atendidos, a fim de que possam ser obtidas as melhores informações, através do uso de modelos matemáticos apropriados. Há muitos detalhes importantes que devem ser considerados na execução de ensaios de adubação. Dois merecem destaque especial: a necessidade de haver repetições de tratamentos e a casualização dos tratamentos no terreno. Repetições de tratamentos são necessárias para poder-se confirmar ou não se as diferenças observadas entre tratamentos são significativas. A casualização é necessária para contornar a ocorrência de diferenças no terreno, dando-se a cada tratamento uma chance igual de ocupar cada parcela experimental. Existem muitas maneiras de planejar ou colocar no campo as parcelas experimentais, dependendo da finalidade do estudo.

Provavelmente o tipo de experimento mais importante para ensaios de adubação é o feito em blocos ao acaso. Cada repetição consiste em um bloco de parcelas experimentais contendo todos os tratamentos, sorteados ao acaso. Na tabela 5.5. é dado um exemplo de ensaios em que se obtiveram curvas de resposta para nitrogênio, fósforo e potássio. Trata-se, no caso, de um tipo de experimento muito útil para estabelecer correlações entre teores de nutrientes nos solos e a resposta de culturas às adubações. Ensaios em blocos ao acaso são muito eficientes para contornar problemas de gradientes de fertilidade na área experimental.

Os dados da tabela 5.5., embora semelhantes aos da tabela 5.2., apresentam mais algumas informações. No caso foi aplicado um dos testes estatísticos existentes para comparar médias. Resultados seguidos das mesmas letras não diferem entre si significativamente. Note-se que são necessárias diferenças consideráveis entre produções para que diferenças sejam consideradas significativas. O coeficiente de variação do ensaio, de 15,4% pode ser considerado médio. Para que meno-

res diferenças fossem consideradas significativas, o ensaio teria de ser mais preciso.

Tabela 5.5. Curvas de resposta de milho às adubações com nitrogênio, fósforo e potássio, obtidas em experimento realizado em podzólico vermelho amarelo, no município de Tietê-SP.

Tratamento	Produção de milho			
	Bloco I	Bloco II	Bloco III	Média (1)
kg/ha	kg/ha			
0 – 90 – 60	3100	1833	1767	2233 d
30 – 90 – 60	3867	1367	2600	2648 cd
60 – 90 – 60	3333	3267	2767	3122 bcd
90 – 90 – 60	5300	4500	3900	4567 a
120 – 90 – 60	3833	4633	4167	4211 ab
90 – 0 – 60	3667	2800	3667	3378 bc
90 – 30 – 60	4900	3500	4100	4167 ab
90 – 60 – 90	5900	4500	3667	4689 a
90 – 90 – 60	5300	4500	3900	4567 a
90 – 120 – 60	4630	4400	3700	4243 ab
90 – 90 – 0	4967	2967	4100	4011 ab
90 – 90 – 30	3733	3300	4300	3778 ab
90 – 90 – 60	5300	4500	3900	4567 a
90 – 90 – 90	5267	4133	4567	4656 a

C.V. = 15,4%

(1) Valores com a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan.

Fonte: Raij, B. van & et al. Submetido para publicação em Bragantia.

Um ponto importante a discutir diz respeito ao número de repetições a realizar. Pode-se perceber que, no caso da tabela 5.5., existem efeitos de nitrogênio e fósforo, com curvas de resposta razoáveis, enquanto que no caso do potássio, a curva seria um tanto estranha. Ora, se forem consideradas as curvas por repetição ou bloco, elas são ainda mais estranhas. A razão de se realizar repetições é que há considerável variação entre elas, devido à variação ao acaso. Então, para se ter uma avaliação razoável das produções obtidas com determinado tratamento, é preciso ter repetições. No exemplo dado foram somente três, provavelmente seria melhor utilizar quatro.

Existem pesquisadores que recomendam não realizar repetições em um mesmo local, preferindo-se utilizar o esforço para colocar mais ensaios sem repetições, ou somente com duas, em mais locais. Isto talvez fosse interessante para obter-se uma resposta média a algum tratamento por região, que não dependesse de solo ou local. Não é válido para a maior parte dos estudos realizados em fertilidade do solo, já que normalmente procura-se estudar relações solo-planta, através de parâmetros de solos e de plantas, cuidadosamente avaliados. É preciso ter precisão nas medidas, para poder-se procurar aquelas relações que explicam o que acontece e que possam ser manipuladas em benefício da maior eficiência na exploração agrícola.

Além do mais, não é fácil encontrar locais apropriados para experimentação de campo, e a condução adequada dos ensaios é difícil. Portanto, é melhor conduzir menos ensaios bons do que muitos ruins. Não deve ser esquecido que a generalização das informações obtidas nos ensaios, para áreas maiores, será feita com o auxílio de diversos critérios, com destaque para a análise de solo. Esses critérios só podem ser desenvolvidos de forma adequada, se baseados em resultados experimentais de boa precisão.

A determinação de curvas de resposta simples por nutriente tem a desvantagem de não considerar interações entre nutrientes. Ensaios fatoriais permitem avaliar essas interações, mais sacrificando muitas vezes a precisão com que se estudam vários níveis de nutrientes. Eles são úteis em duas situações extremas, em condições de desconhecimento completo das respostas dos nutrientes, ou em condições de produtividade elevada, onde interações entre certos nutrientes, ou entre nutrientes e outros fatores de produção, tornam-se importantes.

O delineamento mais utilizado no Brasil no passado, para ensaios de adubação, foi o fatorial 3 x 3 x 3 ou 3^3 (três ao cubo). Na maioria dos casos, doses 0, 1 e 2 dos três macronutrientes principais são testados em todas as combinações possíveis, dando um total de 27 tratamentos. Tais ensaios quase sempre foram analisados do ponto de vista qualitativo, apenas sendo indicado, através de análise de variância, a significância dos efeitos dos nutrientes ou das interações, não sendo ajustada função de resposta aos dados experimentais.

Na tabela 5.6. são apresentados os resultados de um ensaio fatorial 3 x 3 x 3. São apresentadas, também, as produções médias como são calculadas normalmente. Para calibração de análise de solo prefere-se, ao calcular as produções médias para um nutriente, não incluir os tratamentos em que não houve aplicação de um dos outros dois. Isto considerando a idéia de, ao estudar-se um nutriente, não permitir condições de deficiência dos outros. Note-se, pelos dados apresentados, que as produções médias calculadas de uma maneira ou de outra, diferem entre si. Por outro lado, considerar para calibração de

análise de solo apenas resultados de tratamentos isolados, também não é aconselhável, devido à baixa confiabilidade de tais dados, caindo-se no caso de ensaios sem repetição.

Tabela 5.6. Resultados de produção de cana-de-açúcar de um ensaio fatorial 3 x 3 x 3 de adubação. As doses 0, 1 e 2 foram respectivamente 0, 80 e 160 kg/ha de N e K_2O e 0, 90 e 180 kg/ha de P_2O_5. O coeficiente de variação foi de 13%. Houve efeito significativo de nitrogênio, fósforo e da interação nitrogênio x fósforo

Tratamento	Produção	Tratamento	Produção	Tratamento	Produção
	t/ha		t/ha		t/ha
000	63,0	100	53,7	200	77,3
001	55,1	101	62,3	201	55,8
002	65,5	102	74,0	202	59,7
010	79,0	110	99,9	210	116,7
011	94,8	111	107,5	211	117,9
012	92,0	112	92,7	212	116,0
020	87,2	120	107,7	220	125,3
021	81,4	121	106,9	221	134,2
022	92,3	122	117,2	222	139,4

Médias de todos os tratamentos

N_0 – 78,9	P_0 – 62,9	K_0 – 90,0
N_1 – 91,3	P_1 – 101,8	K_1 – 90,7
N_2 – 104,7	P_2 – 110,2	K_2 – 94,3

Médias dos tratamentos excluídos para cada nutriente os tratamentos com doses 0 dos outros dois nutrientes.

N_0 – 90,1	P_0 – 63,0	K_0 – 112,4
N_1 – 106,1	P_1 – 108,5	K_1 – 116,6
N_2 – 126,9	P_2 – 124,4	K_2 – 116,3

Fonte: Alvarez, R. & et al. Bragantia 53:657-675, 1963.

Para estudar muitos níveis de nutrientes, existem delineamentos fatoriais incompletos, que permitem estabelecer a importância das interações, além dos efeitos isolados dos nutrientes. É possível ajustar funções de resposta aos resultados experimentais. Trata-se de assunto que infelizmente vem sendo abordado separadamente da análise de solo.

Quando uma variável y varia em função de uma variável x, chama-se regressão a equação ajustada as dados experimentais e por métodos estatísticos. A regressão pode ser linear, quando representada por uma linha reta e descrita pela equação da reta. Pode ser curvilínea e, neste caso, há um grande número de equações matemáticas que podem ser usadas, inclusive o trinômio do 2.° grau e a equação de Mitscherlich. Podem ser consideradas mais de duas variáveis, através de análises de regressão múltipla.

Equações de regressão são calculadas com base em resultados de experimentos ou de medidas que estão sujeitas a erros e a influências diversas. Existe, portanto, uma dispersão e, por vezes, fica difícil precisar se uma regressão observada tem algum significado prático.

Para indicar o grau de associação entre duas variáveis, existe o coeficiente de correlação, representado por r. O coeficiente de determinação, ou r^2, indica de forma objetiva a relação entre variáveis. Assim, para um coeficiente de correlação de 0,80, corresponde um coeficiente de determinação de 0,64. Isto significa que 64% da associação entre variáveis é devida à regressão estabelecida, sendo os restantes 36% devidos à variação ao acaso.

Várias aplicações do uso de análise de regressão serão feitas nos capítulos seguintes.

5.3. **Análise de solo**

Com a análise de solo pretende-se determinar o grau de suficiência ou de deficiência de nutrientes no solo, bem como condições adversas que podem prejudicar as culturas, tais como acidez ou salinidade.

Já há muito tempo constatou-se que os teores totais dos nutrientes não correspondem ao que as plantas podem aproveitar dos solos. Também já está superada a fase em que procurou-se, através de ácidos orgânicos fracos ou mesmo água, simular a ação das raízes e tentar extrair do solo o «teor disponível» dos nutrientes.

A parte disponível de um nutriente seria aquela que estaria no solo em condições de ser absorvida pelas raízes. Mas há tantos fatores que influenciam essa absorção, desde o solo em si, as transformações a que estão sujeitos os compostos que contém os nutrientes, o mecanismo de absorção e o desenvolvimento do sistema radicular de cada vegetal, que não é possível determinar, ou mesmo definir com precisão, o chamado teor disponível. Evita-se, pois, referir-se a este termo ao tratar-se de resultados de análises de solo.

Embora a disponibilidade não possa ser expressa quantitativamente, consegue-se avaliar a disponibilidade de nutrientes pela análise de solo, estabelecendo índices que, se não representam os valores absolutos dos teores disponíveis, servem não obstante aos objetivos primordiais da avaliação da fertilidade do solo.

É possível, através de uma análise de solo bem feita, avaliar o grau de deficiência de nutrientes e determinar as quantidades a aplicar nas adubações. A seguir será explicado como isto é feito.

5.3.1. Etapas de um programa de análise de solo

Para que recomendações de adubação com base na análise de solo sejam eficazes, não basta a existência de laboratórios. É necessário que uma série de etapas sejam cumpridas, que o sistema encontre suporte em uma ampla experimentação regional. Os assuntos que devem ser considerados são:

a) amostragem correta;
b) ensaios de adubação;
c) seleção de métodos eficientes de análise;
d) laboratórios;
e) correlações entre teores nos solos e respostas de culturas a nutrientes aplicados;
f) estabelecimento de classes de teores de nutrientes;
g) estabelecimento de níveis de adubação.

É evidente que a maioria dessas etapas dizem mais respeito aos que dedicam-se ao trabalho de pesquisa. Contudo, é importante que se tenha uma idéia geral do conjunto de atividades relacionadas à análise de solo e como se chega, partindo dela, a recomendações de adubação.

Dificilmente em uma dada região, todas essas etapas foram desenvolvidas harmonicamente entrosadas e com suficiente lastro experimental. Contudo, será visto nos capítulos seguintes, que alguns aspectos básicos relativos à interpretação da análise de solo têm semelhanças para regiões distintas, o que permite algumas extrapolações.

Em vários países a análise de solo está atingindo atualmente a fase de amadurecimento, sendo considerada de maneira séria e prestando um enorme benefício à coletividade que dela se utiliza.

No Brasil, depois de uma fase de grande expansão da análise de solo nos últimos 15 anos, está-se passando por uma fase de estagnação. Muito disto se deve às imperfeições do sistema ou à falta de definição do significado de suas etapas e de como estas devem ser entrosadas.

Daí a razão de dar-se aqui grande ênfase na descrição das diversas etapas de um programa de análise de solo. Embora reconheça-

se que não há um único caminho possível para organizar tal programa, prefere-se detalhar a descrição de apenas um, que conta já com considerável retaguarda de pesquisa. Descrições de outras abordagens são dadas no livro de Walsh e Beaton (1973).

Basicamente o sistema que será descrito baseia-se em adubações anuais de culturas, ou adubações de manutenção. Existe um outro sistema de adubação que consiste em corrigir a fertilidade do solo a determinados níveis e, por isso mesmo, é chamada de adubação corretiva. Ela é utilizada em algumas regiões do Brasil. A sua discussão se fará no ítem 5.3.7.

5.3.2. A importância da amostragem

Na maioria dos casos a amostra de solo representa a camada arável de áreas que podem chegar a 10 hectares, o que representa um volume de 20 milhões de dm^3 ou litros de terra, para uma camada arável de 20cm de profundidade. Isto significa, se forem enviadas cerca de 400g de terra para o laboratório, que a amostra representará uma parte em 50 milhões de camada arável, considerando o solo com massa específica global unitária. Se for considerado que em diversas extrações são empregadas $10cm^3$ de terra, isto representará uma parte em 2 bilhões de partes da camada arável ou seja, a análise desta pequena fração do solo, deve refletir a fertilidade de um volume 2 bilhões de vezes maior.

Acrescente-se o problema da heterogeneidade natural e ficará bem caracterizado que a amostragem de solos não é uma prática simples. Ela deve ser rigorosamente executada, seguindo instruções baseadas em considerações de ordem científica.

A amostragem é uma etapa crítica de todo o processo de análise. Ela em geral não pode ser repetida e uma amostra mal coletada não revela, pelo seu aspecto, se ela é ou não representativa da gleba amostrada. Um resultado de análise suspeito pode ser verificado através da repetição da análise, mas não há possibilidade de corrigir erros de amostragem.

Na tabela 5.7. são apresentados resultados de um estudo de amostragem de solos. Em duas glebas, foram tiradas diversas séries de amostras, e estudados os valores médios, a dispersão em torno da média, expressa pelo coeficiente de variação, e o número de amostras que seriam necessárias para atingir um limite de confiança de ±20% da média. Foram retiradas por gleba 30 amostras simples, 10 amostras compostas de 5 amostras simples e 5 amostras compostas de 20 amostras simples.

Percebe-se imediatamente que a retirada de uma amostra simples é insuficiente, proporcionando esse tipo de amostragem eleva-

dos coeficientes de variação. Note-se que mesmo amostras compostas de 5 amostras simples não são adequadas. Os resultados melhoram sensivelmente com amostras compostas de 20 amostras simples.

Tabela 5.7. Resultados médios de análises para diferentes amostragens de dois solos, coeficientes de variação (C.V.) e número de amostras necessárias para o limite de confiança de ±20% da média (representado por n). Amostras retiradas de área de quatro hectares em Pindorama e de seis hectares em Ribeirão Preto

Determinação	Amostras	Pindorama			Ribeirão Preto		
		Valor médio	C.V.	n	Valor médio	C.V.	n
			%			%	
Potássio (meq/100g)	30 simples	0,191	73,3	24	0,226	66,4	19
	10 compostas de 5	0,134	29,9	5	0,172	40,7	8
	5 compostas de 20	0,155	19,4	3	0,257	11,7	1
Cálcio (meq/100g)	30 simples	7,52	43,6	9	3,68	44,9	9
	10 compostas de 5	6,06	18,8	2	3,69	18,2	5
	5 compostas de 20	7,51	9,0	1	3,83	9,4	1
Matéria orgânica (%)	30 simples	1,77	27,3	8	3,57	14,0	3
	10 compostas de 5	1,64	10,5	2	3,47	3,5	1
	5 compostas de 20	1,71	9,1	2	3,54	1,0	1
pH	30 simples	7,14	5,3	5	6,18	2,6	2
	10 compostas de 5	7,32	2,2	1	6,22	1,4	1
	5 compostas de 20	7,51	0,9	1	6,38	0,3	1

Fonte: Catani, R.A. & et al. Bragantia 14: 19-26, 1954.

Uma regra adequada para a amostragem de um solo, é coletar sempre 20 amostras simples por amostra composta, qualquer que seja a área a amostrar, mesmo que ela represente apenas 10m^2. Isto porque a variabilidade das propriedades químicas de um solo manifestam-se em pequenas distâncias.

Detalhes sobre amostragem são fornecidos nos impressos utilizados para análise de solo, que serão discutidos no último capítulo. Outros detalhes de ordem prática serão também lembrados.

É importante salientar que tanto as amostras de áreas experimentais, e que irão fornecer os resultados analíticos para calibração da análise de terra, como as amostras de propriedades, devem ser sempre

bem retiradas. A análise de solo é o veículo de transferência de informações sobre adubação e calagem, oriundas da pesquisa, ao agricultor, mas a eficiência dessa transferência depende de amostras corretamente obtidas.

5.3.3. Seleção de métodos de análise

O estudo de métodos de análise de solo tem sido a motivação principal de muitos trabalhos de pesquisa realizados em todo o mundo. Há um enorme número de maneiras de extrair nutrientes de solos, de expressar resultados e de conceituar o que seriam parâmetros adequados para descrever a disponibilidade dos nutrientes.

Um dos problemas difíceis de um bom programa de análise de solo, é a exigência da realização de estudos regionais para a implantação dos métodos mais adequados, que devem ser apropriados para as condições de solo e fornecer boas correlações com respostas de culturas as adubações. Neste ponto, a análise de solo difere da diagnose foliar pois, neste caso, os mesmos métodos podem ser usados em diferentes regiões.

Na seleção de um método de análise, deve-se levar em conta informações da literatura. Caso haja várias opções adequadas, devem ser realizados estudos incluindo ensaios com plantas.

Um tipo de estudo muito interessante para selecionar métodos de análise consiste em conduzir um ensaio em vasos com amostras de diversos solos provenientes da região, variando bastante naquelas propriedades que afetam a disponibilidade do nutriente em questão. Os solos devem receber todos os nutrientes necessários para o desenvolvimento vegetal, menos o que está em teste. Uma planta é cultivada, por exemplo o milho por oito semanas, admitindo-se como único fator a afetar o crescimento, a disponibilidade do nutriente testado no solo. Colhem-se as plantas e determinam-se as quantidades absorvidas do nutriente. Determina-se o nutriente em amostras dos mesmos solos, separadas antes do ensaio, por vários métodos. Estudos de correlação entre teores dos nutrientes nos solos, determinados pelos diversos métodos, e as quantidades absorvidas pelas plantas, indicarão as melhores possibilidades.

Ensaios de campo de boa qualidade podem também ser utilizados na seleção de métodos.

Em princípio deveria ser escolhido para uma determinação qualquer, aquele método que fornecesse as melhores correlações com as respostas de culturas às adubações com o nutriente. Na prática ocorrem dificuldades. Frequentemente é necessário optar por um método

de análise antes mesmo da realização da pesquisa. Isto é válido, pois, existem muitas informações disponíveis sobre os diferentes métodos e que podem orientar sobre uma boa escolha. Alguns outros critérios, que têm influência na escolha de um método, são a facilidade de execução analítica, custo, influência de organizações com liderança no assunto, vantagens em manter-se uniformidade entre diversos laboratórios, razões de preferência pessoal, etc.

No Brasil há bastante uniformidade nas determinações feitas nos laboratórios de rotina de análise de solo. Os métodos utilizados mais comuns serão discutidos nos capítulos referentes a acidez e calagem, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

É de esperar-se a implantação futura, nos laboratórios de análise de solo no Brasil, de determinações de enxofre e micronutrientes. Alguns laboratórios já fazem essas determinações, mas as interpretações dos resultados de análise são ainda tentativas.

5.3.4. Correlações entre respostas de culturas e teores em solos

Um método de análise de solo somente deve ser utilizado para fins de recomendação de adubação ou de correção do solo, se for demonstrada a existência de correlação entre o resultado analítico e a resposta de culturas.

O estudo dessas correlações pode ser realizado de diversas maneiras, usando diferentes modelos matemáticos. Aqui será descrita apenas uma delas, simples, mas eficaz, e que tem já comprovação para diversas culturas.

Para o estabelecimento de correlações para fósforo e potássio, são considerados os teores dos nutrientes no solo e as respostas à adubação, expressas em termos de produção relativa. A produção relativa para potássio, por exemplo, é dada pela expressão

$$\text{P.R.} = \frac{100\text{x (Produção com Adubação Completa Menos Potássio)}}{\text{Produção com Adubação Completa}} \quad (5.1)$$

Nos casos em que há disponibilidade de curvas de resposta, pode-se considerar como 100 a produção máxima calculada.

No ítem 4.5. já foi discutida a importância da produção relativa, ou porcentagem de suficiência. Para nutrientes relativamente imóveis, trata-se de um parâmetro que é pouco afetado por fatores não controlados que influenciam a produtividade. A vantagem de utilizar produções relativas ou porcentagens de suficiência no estabelecimento de correlações entre respostas às adubações e teores de nutriente em solos, está na minimização dos efeitos de condições climáticas, que

afetam a produtividade e, portanto, as respostas em termos absolutos, mas afetam pouco as produções relativas.

Uma das críticas que às vezes é feita ao uso da porcentagem de suficiência para exprimir os efeitos dos fertilizantes, é que ela não permite a avaliação econômica dos efeitos da adubação, por não apresentar significado agronômico. Tal crítica não procede. O emprego da produção relativa faz-se apenas nas fases de estabelecimento de correlações e calibração de teores de nutrientes em solos. Daí em diante, as produções absolutas são utilizadas para estabelecer níveis de adubação.

Na figura 5.1. apresenta-se, como exemplo, a correlação entre teores de potássio no solo e as respostas à adubação potássica de algodão, cana-de-açúcar e feijão, expressas em termos de produção relativa. Utilizou-se uma equação do tipo $y = a + b/x$, que ajustou-se muito bem aos dados experimentais. Outras equações podem ser usadas, mas a utilizada revelou-se a mais eficiente entre várias alternativas testadas.

No caso ilustrado utilizou-se, nos cálculos de produção relativa, apenas um nível de adubação potássica, além do tratamento sem potássio. Nesses casos, surgem valores acima de 100% de produção relativa, indicando que as produções sem potássio foram maiores do que as produções com potássio ou, em outras palavras, efeitos depressivos na produção. Em parte isto se deve às variações ao acaso dos resultados experimentais, não sendo essas diferenças em geral estatisticamente significativas.

O tipo de equação ajustada $y = a + b/x$ é muito conveniente neste caso. Note-se que há uma queda vertiginosa de produção relativa quando os teores caem abaixo de cerca de 0,10 meq/100cm^3 de terra. Este é um aspecto que merece muita atenção, pois, as conseqüências práticas são fáceis de perceber. Curvas similares serão mostradas nos capítulos relativos a fósforos e potássio.

A ocorrência de produções relativas acima de 100% impede o uso da equação exponencial de Mitscherlich, no ajuste aos dados. Se a correlação partir de valores de produções relativas calculadas de curvas de resposta, tal problema não existe e pode-se ajustar aos dados de equações do tipo exponencial ou suas formas logarítmicas tranformadas.

É, talvez, surpreendente, que uma correlação única tenha sido adequada para culturas tão diferentes como feijão, algodão e cana-de-açúcar (figura 5.6.). Possivelmente com o refinamento de trabalhos como esses, aliado à elevação da produtividade, curvas de calibração diferentes sejam obtidas para culturas de exigências nutricionais muito diversas.

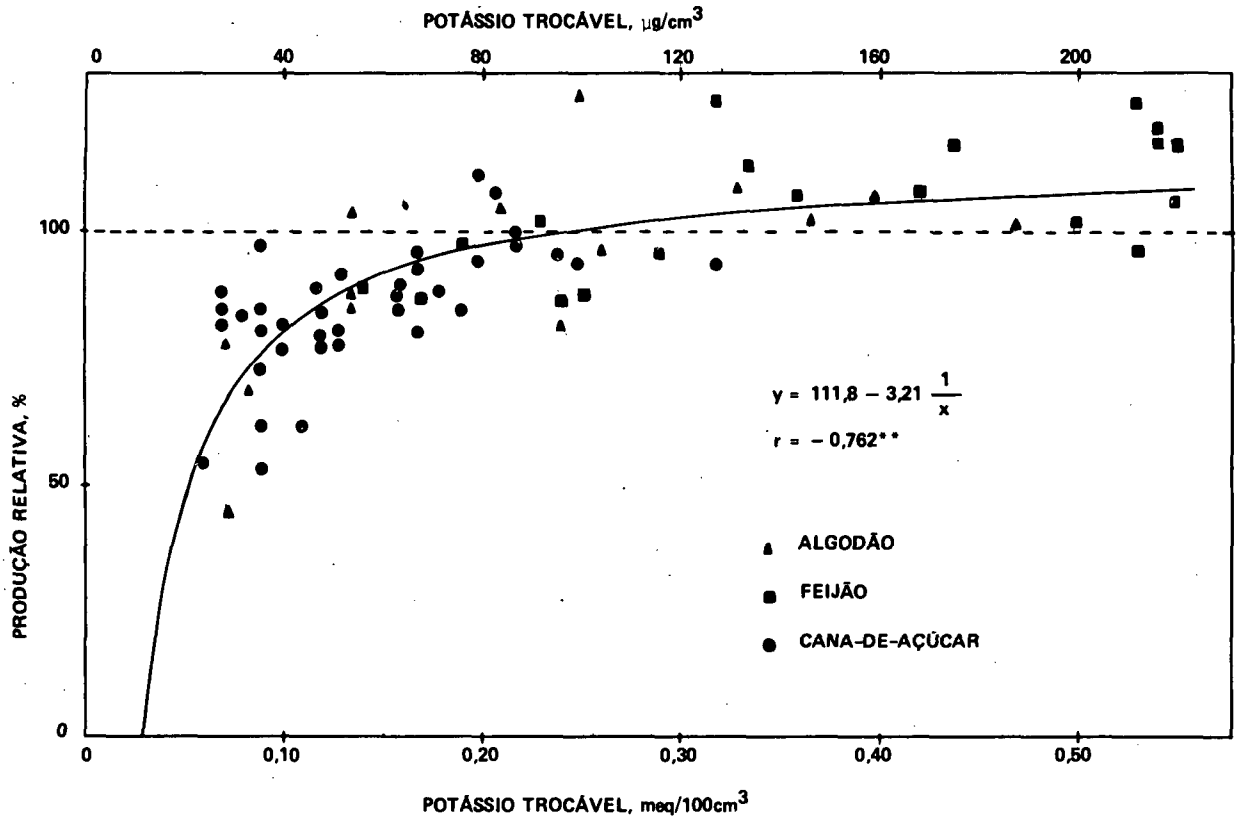

Figura 5.1. Correlação entre a resposta de três culturas à adubação potássica e os teores de potássio trocável nos solos. Cada ponto representa um ensaio diferente. Fonte: Raij, B. van. Ciência e Cultura 26: 575-579, 1974.

Correlações entre respostas à adubação e teores no solo, têm sido obtidas para fósforo e potássio. No caso da acidez há, também, relação entre parâmetros indicativos da acidez nos solos e respostas à calagem, embora bastante variáveis de cultura para cultura.

5.3.5. Estabelecimento de classes de teores de nutrientes no solo

Freqüentemente as classes de teores no solo são delimitadas sem um critério claramente definido. Por muito tempo usou-se em São Paulo, para diversos nutrientes, a divisão em teores altos, médios e baixos.

Um método gráfico simples que tem sido bastante utilizado no Brasil, permite a criação de duas classes de teores, com um grupo de solos para os quais haveria uma possibilidade grande de resposta ao nutriente em questão, e outro grupo de solos com pequena probabilidade de resposta (Cate & Nelson, 1965). Um exemplo da aplicação desse método é dado na figura 5.2. Note-se que no eixo dos x são indicados os teores do nutriente no solo e no eixo dos y as produções relativas. Move-se um plástico com duas perpendiculares sobre a figura, de forma que um máximo de pontos caiam em dois quadrantes opostos. As linhas são então traçadas no gráfico, obtendo-se o limite crítico, como indicado.

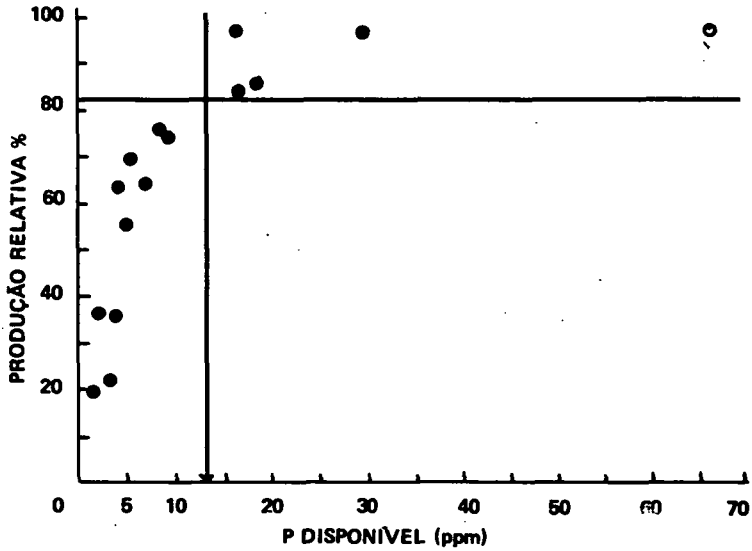

Figura 5.2. Determinação de limite crítico de fósforo no solo usando processo gráfico. Fonte: North Carolina State University, Agronomic-economic research on tropical soils. Annual Report for 1974. p.89.

O processo descrito para estabelecer um limite crítico só é válido para resultados de ensaios de campo. Ele é muito prático e simples e serve como uma primeira aproximação ou, possivelmente, para casos em que uma calibração detalhada não seja importante, como seria o caso para macronutrientes secundários e micronutrientes.

Nos casos de fósforo e potássio exige-se mais refinamento, não bastando separar os solos, com base na análise de solo, naqueles de maior ou menor resposta. É necessário fornecer uma base, para recomendar adubação em quantidades adequadas aos nutrientes já existentes no solo e, também, para poder avaliar a fertilidade do solo com o passar do tempo.

Em São Paulo foi introduzido um critério que relaciona os teores de fósforo ou potássio no solo com a produção relativa. Exemplos específicos serão dados nos capítulos relativos a fósforo e potássio. Os critérios utilizados são apresentados na figura 5.3.

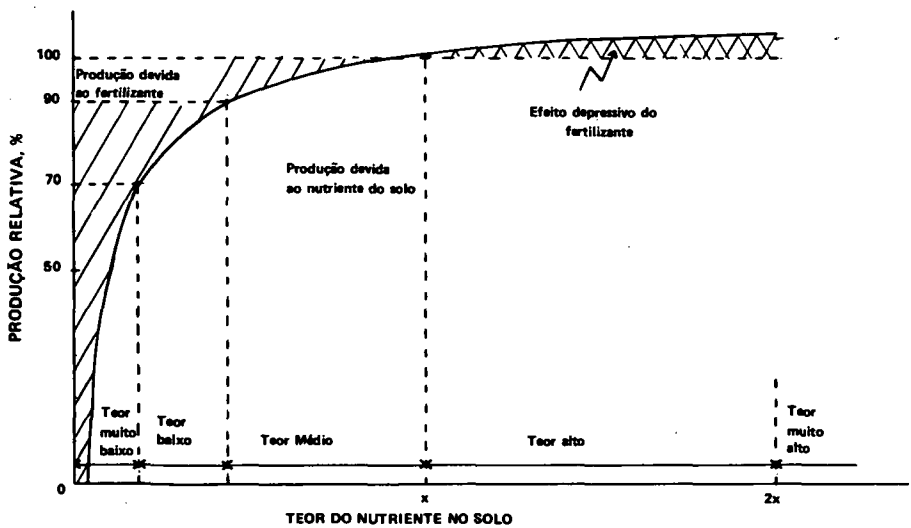

Figura 5.3. Esquema de delimitação de classes de teores de nutrientes no solo. Os limites de classes de teores estão relacionados com a produção relativa. Este esquema é usado para fósforo e potássio.

O importante do critério ilustrado, é a amarração que é feita dos limites de teores de fósforo ou potássio com a produção relativa. Para a classe de teores muito baixos corresponde uma faixa de 0 a 70% de produção relativa, para os teores baixos de 70 a 90% e para os teores médios de 90 a 100%. Na classe de teores altos espera-se que as quanti-

dades de nutrientes existentes no solo sejam suficientes para a produção máxima. Utiliza-se o limite inferior da classe de teores altos, x no caso da figura, multiplicado por 2, para estabelecer o limite entre as classes de teores altos e muito altos. A classe de teores muito altos ainda não é utilizada em tabelas de adubação, mas ela serve de referência para acompanhar o efeito das adubações no solo.

Note-se que o termo calibrar é empregado para designar o estabelecimento de classes de teores de um elemento no solo, com base em correlação com respostas a adubações. Não se trata de estabelecer níveis de adubação. Estas são determinadas por outros métodos.

Poder-se-ia considerar a adubação dispensável se o teor de um nutriente, fósforo ou potássio, for alto no solo, isto porque não se esperaria resposta. Contudo, um programa de adubação não deve visar apenas o máximo proveito em um ano, às custas da fertilidade do solo e da produtividade futura. É mais razoável cuidar-se de manter a fertilidade em níveis adequados. Com base nisso, as sugestões para adubação se fariam de acordo com o que está na tabela 5.8. A quantificação para cada cultura se faz com base em curvas de resposta.

Tabela 5.8. Indicação qualitativa das adubações fosfatadas e potássica, com base nos teores no solo de P ou K

Teores no solo	Produção relativa	Adubação com fósforo ou potássio
	%	
Muito baixos	0 – 70	Máxima economicamente viável para a cultura, suficiente para elevar os teores no solo
Baixos	70 – 90	Como no caso anterior, mas os níveis de adubação são menos elevados.
Médios	90 – 100	Devem ser feitas adubações moderadas, visando manter ou elevar os teores de P ou K no solo.
Altos	> 100	Não se espera resposta, em termos médios. Recomenda-se adubações leves de manutenção ou de arranque.
Muito altos	> 100	Usar doses mínimas ou dispensar o uso de P ou K para culturas menos exigentes. A decisão de dispensar aplicação de um nutriente deve ser tomada considerando o histórico da gleba.

5.3.6. Níveis de adubação

Para estabelecer níveis de adubação, os resultados experimentais de curvas de resposta, são grupados com base nos teores no solo, de fósforo ou potássio. Determinam-se as doses mais econômicas, para teores no solo muito baixos, baixos e médios, conforme já foi discutido no ítem 4.8.

Os valores determinados servem de base para construir tabelas de adubação, mas não são somente as doses econômicas que devem ser consideradas. É preciso considerar a manutenção da fertilidade do solo e, também, que existe um grau de incerteza na análise de solo, bem como no comportamento das culturas frente às adubações. É, então, uma boa prática recomendar sempre alguma quantidade de fósforo ou potássio, a não ser que se tenha certeza absoluta que o solo está muito bem suprido. Estas são as razões porque, mesmo para teores altos de fósforo ou potássio no solo, recomenda-se a aplicação de quantidades moderadas a baixas de fertilizantes.

No caso do nitrogênio, a determinação da dose mais econômica aplica-se também, só que no caso deste elemento utiliza-se a média dos ensaios disponíveis, por não existir ainda critério eficaz para separar resultados experimentais com base na análise de solo. Também é importante considerar o nível de produtividade e outros critérios, que serão discutidos no capítulo referente a nitrogênio.

Não existem ensaios para diversas culturas de menor importância e, provavelmente, nunca existirão. Para construir tabelas de adubação nesses casos, são levados em consideração conhecimentos de solos, de culturas similares, as necessidades de nutrientes, etc.

Para algumas culturas de alto valor econômico, para as quais a adubação representa apenas uma pequena parcela do custo de produção, há uma tendência em utilizar adubações fixas, as vezes muito elevadas, sem atentar para a análise de solo. Não é uma medida muito correta, pois, mesmo nesses casos, a curva dos incrementos decrescentes continua válida, embora a dose mais econômica aproxime-se da dose necessária para atingir a produção máxima. Aplicações de quantidades excessivas de fertilizantes, além de desnecessárias, podem deprimir as produções.

5.3.7. Adubação corretiva

Até aqui discutiu-se a adubação com base na análise de solo, para fósforo e potássio, considerando a resposta da cultura dentro das classes de teores dos elementos no solo. Não se mencionou o que irá ocorrer com os teores dos nutrientes no solo. Ocorre que, em geral, eles aumentam se forem utilizadas as adubações recomendadas, já que

as quantidades de fertilizantes, principalmente fósforo, ultrapassam as extrações pelas culturas. Não é sempre o caso do potássio.

Mas fica a questão. Quanto de fósforo ou de potássio deve ser aplicado ao solo para elevar os teores dos elementos a valores considerados ótimos? Isto pode ser determinado e pode-se estabelecer níveis de adubação corretiva que seria a adubação do solo, contrastando com a adubação de manutenção, que seria a adubação até agora discutida, e que visa mais a cultura.

No Rio Grande do Sul introduziu-se um sistema de adubação dupla, consistindo numa adubação corretiva, visando elevar os teores de P em K em solos muito deficientes, além de uma adubação de manutenção aplicada antes de cada cultura.

Esta filosofia de adubação tem como objetivo principal conseguir produtividades altas em curto prazo, em solos de baixa fertilidade. Ela é hoje praticada nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e em parte do Brasil Central.

5.4. **Análise de plantas**

A análise química de plantas permite avaliar concentrações e relações de nutrientes, constituindo uma forma indireta de avaliação da fertilidade do solo. Em trabalhos de pesquisa, e principalmente em ensaios de vasos, são analisadas plantas inteiras. Para condições de campo, é mais comum a análise de apenas parte da planta, mais frequentemente folhas, mas também pecíolos ou outras partes.

A chamada diagnose foliar consiste em analisar amostras de folhas, para verificar o estado nutricional de uma cultura. Deve ser obtida uma amostra constituída de folhas coletadas de diversas plantas, o número variando por espécie podendo chegar a 100 no caso de cereais. Devem ser coletadas amostras de posições determinadas das plantas e em período definido da cultura. Isto porque as concentrações dos nutrientes em folhas variam com a posição da folha e a idade da planta.

Uma das grandes diferenças entre a análise de solo e a diagnose foliar é a oportunidade. A primeira é feita antes da cultura, no caso de plantas de ciclo curto, antecipando os problemas. Já a diagnose foliar, realizada durante o desenvolvimento da cultura, muitas vezes não permite mais uma solução em tempo útil, principalmente também pela maior demora nas análises de material vegetal.

A diagnose foliar é uma técnica de avaliação da fertilidade do solo que tem nitidamente um caráter de complementar a técnica da análise de solo. Isto deverá ficar claro na discussão seguinte.

O uso dessa técnica no Brasil é ainda incipiente e ela é ainda

muito menos usada que a análise de solo. A sua interpretação é mais complexa e o seu custo muito mais elevado. Enquanto que a análise de solo é recomendável periodicamente para quase todas as condições de cultivo, a diagnose foliar deve ser usada em certas condições.

Uma das premissas mais antigas da análise de plantas baseava-se na idéia de que o conteúdo de nutrientes na planta seria proporcional à sua disponibilidade no solo. Isto não é bem assim, e diversos fatores complicam as relações entre teores no solo e na planta.

Na figura 5.4. é mostrado um gráfico que indica a relação entre um nutriente vegetal e a produção. Iniciando na extremidade esquerda da curva, com uma concentração baixa, o crescimento é também reduzido. Com um aumento no suprimento do nutriente, o crescimento aumenta, porém inicialmente ocorre um abaixamento da concentração devido a um efeito de diluição, proporcionado pela maior produção de material vegetal. Na concentração de deficiência acentuada, para teores similares, podem ocorrer níveis muito variáveis de produção, sempre devido à diluição do nutriente no material vegetal. É apenas naquelas concentrações correspondentes a deficiências leves que há uma relação mais nítida entre produção e concentração do nutriente, isto até ser atingido o nível crítico. Acima deste, o aumento de concentração não mais corresponde a aumentos de produção ou de crescimento, representando um consumo desnecessário ou de luxúria do nutriente. A situação pode agravar-se em concentrações muito elevadas, onde se verifica um efeito tóxico traduzido em decréscimo de produção. A ocorrência de consumo de luxúria ou toxidez de nutrientes é variável para culturas e nutrientes.

Durante o desenvolvimento das plantas, ocorre a transferência de certos nutrientes de algumas partes para outras das plantas. Daí a necessidade da padronização rigorosa da amostragem, já referida anteriormente, tanto no que se refere ao período vegetativo, como ao tipo e posição de folhas, a fim de que seja possível obter resultados comparáveis para amostragens em situações diferentes.

Os teores de nutrientes nas folhas nem sempre apresentam correlação direta com os teores disponíveis no solo. Isto porque existem outros fatores que afetam a absorção pelas plantas, além da disponibilidade no solo dos nutrientes, tais como condições de umidade, aeração, compactação, acidez, moléstia das raízes, etc.

Alguns nutrientes podem afetar a absorção de outros, inibindo-a, em ação de antagonismo, ou favorecendo-a, em ação de sinergismo. Por isso, é sempre aconselhável realizar a diagnose foliar para diversos nutrientes, mesmo que o interesse direto não seja por todos.

Mesmo com as dificuldades que ainda envolvem a interpretação de resultados, a diagnose foliar vem desenvolvendo-se, e hoje ela tem algumas aplicações bem definidas e outras que se delineam como

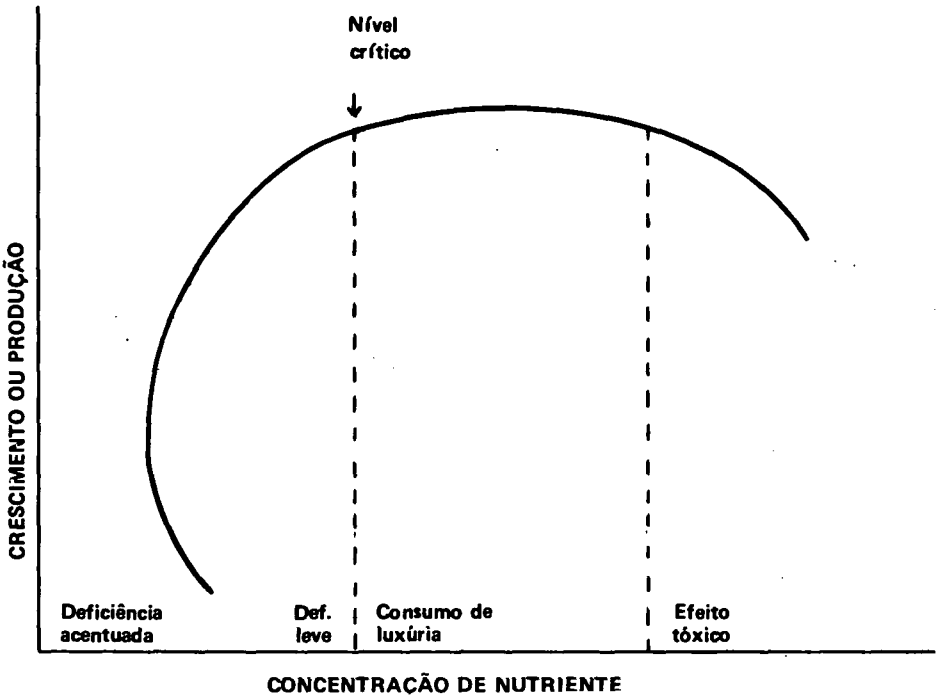

Figura 5.4. Relação entre o crescimento vegetal e o conteúdo de nutriente.

promissoras, destacando-se as seguintes: a) levantamento do estado nutricional de culturas; b) confirmação de sintomas visíveis de carências de nutrientes; c) diagnóstico de áreas de deficiências incipientes; d) identificação de interações ou antagonismos; e) verificação da entrada na planta de nutrientes aplicados; f) avaliação do estado nutricional de plantas perenes.

5.5. Uso alternativo da análise de solo ou da diagnose foliar

Tem-se considerado por vezes a diagnose foliar como sendo uma técnica alternativa para avaliação de fertilidade do solo, em relação à análise de solo. Não é bem o caso e a oportunidade de uso de uma ou outra depende da cultura, do nutriente em questão e do problema. Além disso, ambas técnicas necessitam, para o seu constante desenvolvimento e aperfeiçoamento, de um considerável lastro de pesquisa. Tem acontecido que em certas regiões há grupos que dedicam-se mais à análise de solo, enquanto que em outras o interesse maior é pela diag-

nose foliar e, assim, uma desenvolve-se mais que a outra. Na realidade as duas servem a uma só finalidade e, assim sendo, devem ser consideradas em conjunto, optando-se em cada caso pela que for mais conveniente.

Se for considerada a oportunidade ou época de execução, a análise de solo leva uma vantagem incontestável. Ela pode, principalmente no caso de culturas de ciclo curto, ser feita antes da cultura e, assim, providências necessárias podem ser tomadas com antecedência. Por outro lado, a diagnose foliar é feita quando as culturas já estão bastante desenvolvidas e qualquer problema diagnosticado dificilmente pode ser resolvido em tempo. Mesmo para culturas perenes e semi-perenes não é, em geral, possível diagnosticar pela análise das plantas e corrigir problemas em um mesmo ano agrícola, a não ser em empresas muito bem organizadas que conseguem análises e aplicação de medidas corretivas rapidamente.

A figura 5.5. dá uma idéia da relação entre a análise de solo e a de planta, ilustrando o que já foi explicado e mostrando que, em geral, a diagnose foliar não é uma técnica que pode substituir a análise de solo. Ela é eficiente para teores baixos mas, para teores altos, a análise de solo seria melhor.

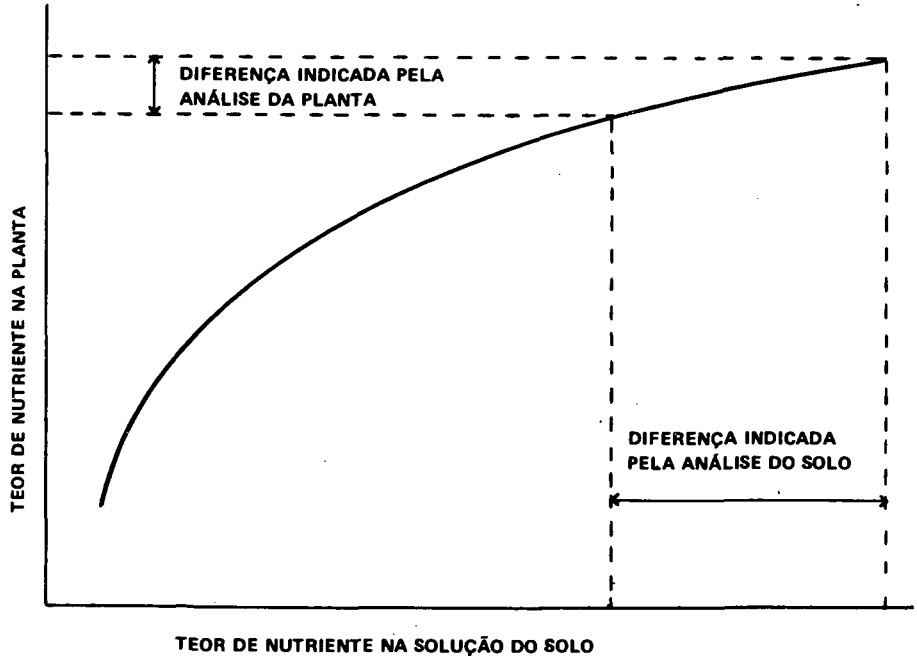

Figura 5.5. Relação entre o teor de nutriente na solução do solo e o teor de nutriente na planta.
Adaptado de Mengel & Kirkby (1978).

A figura 5.5., embora baseada em resultados reais, não reflete uma situação geral, já que na análise de solo não são medidos os teores de nutrientes na solução do solo. Cabe, então, entrar em detalhes sobre as vantagens de uma ou de outra técnica, conforme o caso.

A análise de solo é insubstituível para avaliar a reação do solo e problemas a ela relacionados, tais como acidez, alcalinidade e salinidade, bem como para determinar medidas corretivas.

Ela também é eficaz para fósforo, potássio, cálcio e magnésio. No Brasil ainda não está difundida a análise de solo para enxofre e micronutrientes, mas existem boas perspectivas para essas análises. O grande problema é o nitrogênio, para o qual não existe critério seguro neste país através da análise de solo.

Onde a análise de solo é eficaz, a diagnose foliar tem pouco interesse direto. Contudo, pode haver casos em que haja necessidade de elucidar situações duvidosas, tais como confirmar ou esclarecer sintomas de deficiência ou diagnosticar problemas de carências de causa desconhecida.

A diagnose foliar vem-se desenvolvendo para algumas grandes culturas perenes ou semi-perenes em diversos países, tais como citros, abacaxi, cana-de-açúcar, banana, café, etc., através de programas bem conduzidos. Ela também é usada com sucesso em algumas regiões para olericultura, horticultura e floricultura.

Na situação atual a análise de solo deve ser mais utilizada para caracterizar teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio nos solos e caracterizar o grau de acidez. Já no caso de micronutrientes e enxofre, em princípio eles poderiam ser determinados em solos no Brasil, contudo a interpretação das análises ainda não evoluiu o suficiente para permitir uma diagnose segura. Nesses casos a diagnose foliar é mais aconselhável.

6. ACIDEZ E CALAGEM

A reação do solo é o primeiro fator que precisa ser conhecido em uma gleba a cultivar. Isto porque, caso ela não seja favorável, medidas corretivas devem ser tomadas com antecedência aos cultivos. Existem hoje técnicas seguras para caracterizar a reação do solo e para determinar medidas corretivas.

A condição desfavorável de reação do solo mais comum no Brasil, é a acidez excessiva. Este capítulo trata de sua caracterização e das técnicas disponíveis para avaliar a necessidade de calagem para corrigir a acidez.

6.1. Conceitos de acidez

Do ponto de vista químico, o conceito mais simples de ácido é suficiente para ilustrar as idéias relacionadas à acidez dos solos.

Ácidos são substâncias que em solução aqüosa liberam íons hidrogênio, H^+, de acordo com a seguinte reação:

$$HA \rightleftharpoons H^+ + A^- \qquad (6.1)$$

O ácido HA, em solução aqüosa, dissocia-se mais ou menos, de acordo com a sua natureza, no catíon H^+ e no anion (simbólico) A^-. Os chamados ácidos fortes dissociam-se completamente. Já os ácidos fracos, que têm muito mais pertinência a problemas de acidez em solos, dissociam-se muito pouco.

Por ácidos fracos dissociaram-se muito pouco, ocorrem nas soluções aqüosas concentrações muito baixas de íons hidrogênio, tão baixas que seria difícil representá-las na notação de frações decimais. O conceito de pH foi introduzido para representar a concentração ([1]) de íons hidrogênio e é definido por:

([1]) Mais correto seria tratar de atividade ao invés de concentração. Contudo, os cálculos e idéias expostas não necessitarão do conceito de atividade.

$$pH = -\log(H^+) = \log \frac{1}{(H^+)} \qquad (6.2)$$

Se se tiver uma concentração 0,000001 molar ou 10^{-6} M em H^+, o pH resultante será de 6.

A escala de pH varia de 0 a 14. Em solos podem ser encontrados valores de 3 a 10, com variações mais comuns em solos brasileiros entre 4,0 a 7,5. Solos com pH abaixo de 7 são ácidos.

É necessário ressaltar que o conceito de pH para solos está relacionado com a maneira de determinação. Comumente a determinação é feita em água, em uma relação de 1:2,5 de terra e água. O pH é, portanto, medido nessa suspensão de terra em equilíbrio com água. Este será o conceito de pH que será utilizado doravante. Se o pH for medido em uma relação 1:1, ele será ligeiramente mais baixo; em uma suspensão 1:5, por exemplo, ele será mais alto. Se o pH for medido em soluções salinas, e freqüentemente ele é determinado em soluções de cloreto de potássio 1N ou de cloreto de cálcio 0,01M, ele será mais baixo. A diferença será de até uma unidade ou mais no primeiro caso, e de menos de uma unidade no segundo caso, mas as diferenças variam bastante de solo para solo.

Voltando a considerar a reação 6.1., denomina-se acidez ativa a traçao ou parte do hidrogênio que está dissociado e, portanto, na forma de H^+. A parte não dissociada do hidrogênio é chamada acidez potencial. Esses termos têm sua origem em química analítica, mas podem ser usados para solos.

Em solos a maior parte do hidrogênio não está dissociado. Isto significa que o comportamento assemelha-se a de ácidos fracos.

O alumínio tem sido bastante associado com acidez de solos e tem sido usada a afirmação de ser o alumínio o responsável pela acidez de solos, principalmente tropicais. Trata-se de uma idéia completamente distorcida.

Existem no solo diversos minerais que contém apreciáveis teores de alumínio, principalmente os minerais de argila e óxidos de alumínio, conforme foi visto no capítulo 2. Em condições de acidez elevada, o alumínio surge em solução, na forma de catíon Al^{+3}, às custas da dissolução daqueles minerais, conforme a reação.

$$Al(OH)_3 + 3H^+ \text{——} Al^{3+} + 3H_2O \qquad (6.3)$$

A acidez extrema de solos promove o aparecimento do alumínio em solução, que passa a ser um catíon trocável. Portanto, o alumínio trocável é conseqüência da acidez dos solos. Ele é responsável por parte dos efeitos desfavoráveis da acidez dos solos sobre os vegetais,

mas isto já é mais um problema de nutrição vegetal e não de química do solo. Em condições de acidez elevada podem também ocorrer teores de manganês em níveis tóxicos e até mesmo de ferro.

6.2. Origem da acidez dos solos

Admitindo que a capacidade de troca de catíons medida a pH 7 tem um valor constante, o solo será tanto mais ácido, quanto menos dessa capacidade de troca for ocupada por catíons básicos, tais como cálcio, magnésio, potássio e sódio. A acidificação do solo consiste, portanto, na remoção dos catíons básicos do complexo de troca catiônica.

Solos podem ser naturalmente ácidos, ou pela própria pobreza de materiais de origem, que podem ter teores baixos de catíons básicos, ou por condições de pedogênese ou de formação do solo, que favorecem a remoção de elementos químicos do solo. Além disso, os solos podem ter a sua acidez aumentada por cultivos e adubações, que podem conduzir à perda de catíons básicos.

Como em geral em solos predominam as cargas negativas, os catíons são retidos nestas. Para haver remoção desses catíons e portanto, acidificação do solo, é preciso haver aníons. Se são adicionados sais neutros ao solo, no máximo pode haver troca iônica entre os catíons adicionados e os trocáveis existentes. A acidificação do solo ocorre quando são adicionados aníons ao solo sem os catíons básicos correspondentes. Isto corresponde a adicionar co-íons à solução do solo, que passam a exigir, para manutenção da eletroneutralidade, a presença de catíons básicos, que saem dos catíons trocáveis (vide figura 3.1.). Os aníons da solução do solo, se houver percolação de água através do solo, são removidos, arrastando com eles catíons básicos.

Há duas maneiras principais de adicionar aníons sem catíons básicos ao solo, provocando acidificação. A primeira maneira ocorre naturalmente pela dissociação do gás carbônico, de acordo com o equilíbrio.

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \qquad (6.4)$$

Portanto, são introduzidos em solução o íon hidrogênio e o aníon bicarbonato, HCO_3^-. Imediatamente o hidrogênio transfere-se para a fase sólida do solo e libera um catíon trocável. Portanto, pode haver remoção de bases do solo por lixiviação de bicarbonato. A reação 6.4. é favorecida por valores de pH mais elevados. Valores de pH mais baixos e, portanto, maiores concentrações de H^+, tornam a dissociação menos importante e chegam a impedi-la a pH abaixo de 5,2. Portanto, em solos muito ácidos não é provável uma grande acidificação através do bicarbonato.

A segunda grande causa de acidificação dos solos, a mais importante, é ocasionada pelos fertilizantes acidificantes adicionados ao solo. Tomando como exemplo o sulfato de amônio, um dos fertilizantes de maior poder de acidificação, têm-se as seguintes reações:

$$(NH_4)_2SO_4 \rightarrow {}_2NH_4^+ + SO_4^{2-} \quad (6.5)$$

$$2NH_4^+ + SO_4^{2-} + 4O_2 \rightarrow 2NO_3^- + 4H^+ + 2H_2O + SO_4^{2-} \quad (6.6)$$

Portanto, o catíon amônio, NH_4^+, adicionado ao solo, transforma-se em um anion. A conseqüência é a liberação, para cada fórmula de $(NH_4)_2SO_4$, de 4 íons H^+, ficando os aníons SO_4^{2-} e NO_3^- livres, exigindo pois, como no caso anterior, que catíons básicos passem para a solução do solo, ficando assim sujeitos à lixiviação através do perfil e proporcionando uma acidificação do solo. Na prática a acidificação só não atinge o máximo teórico permitido pela equação 6.6., porque grande parte dos íons NO_3^- e uma parte menor dos íons SO_4^- são absorvidos pelas plantas, reduzindo as perdas.

Quando o amônio provém da mineralização da matéria orgânica, o resultado da nitrificação é também acidificante, de uma forma similar ao processo da equação 6.6.

6.3. **Neutralização de ácidos e solos**

Solos apresentam algumas semelhanças com ácidos fracos, a principal consistindo no fato de apenas uma fração da acidez total manifestar-se como acidez ativa (expressa pelo pH), a maior parte da acidez ficando na forma de acidez potencial, correspondendo ao hidrogênio não dissociado. Solos, tal como ácidos fracos, apresentam considerável poder tampão, o que faz com que o pH varie pouco quando são adicionadas pequenas quantidades de ácido ou base.

Se a acidez de um solo é indesejável, ela deve ser neutralizada. A neutralização de um ácido pode ser representada por:

$$HA + NaOH \rightarrow NaA + H_2O \quad (6.7)$$

Da mesma maneira ocorreria a neutralização de um solo:

$$Solo - H + NaOH \rightarrow Solo - Na + H_2O \quad (6.8)$$

Na neutralização de solos é muito utilizado o carbonato de cálcio, que é um sal básico. A reaçao resultante é:

$$Solo - H_2 + CaCO_3 \rightarrow Solo - Ca + H_2O + CO_2 \quad (6.9)$$

Se a vários solos forem adicionadas quantidades crescentes de $CaCO_3$ e for medido o pH resultante após algum tempo de incubação, são obtidas curvas de neutralização como as da figura 6.1. Neste ponto é importante salientar que os solos diferem nas necessidades de $CaCO_3$ para proporcionar uma mesma mudança de pH. Diz-se que os solos diferem em poder tampão. Essas diferenças são devidas à capacidade de troca, que é maior em solos mais ricos em matéria orgânica e/ou com teores mais elevados de argila e, ainda, quando a argila apresenta maior atividade de superfície.

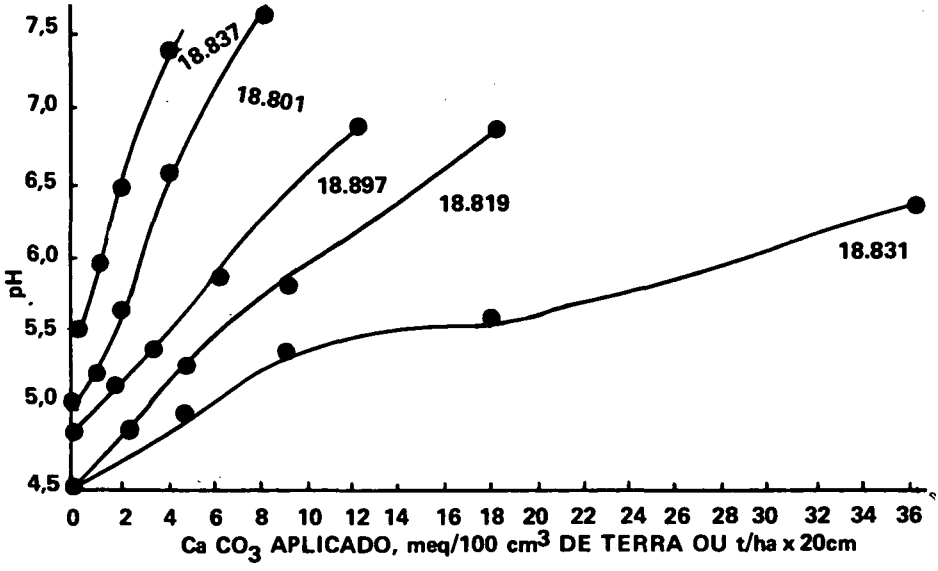

Figura 6.1. Curvas de neutralização de cinco amostras de solos com $CaCO_3$, 18.837 - regossolo; 18.801 - latossolo vermelho-amarelo, fase arenosa; 18.897 - latossolo vermelho-amarelo, húmico; 18.819 - latossolo vermelho-escuro orto; 18.831 - solo com B câmbico.
Fonte: Raij, B. van et al. **Bragantia 38: 57-69, 1979.**

Se a elevação do pH for considerada como uma das metas a atingir (considerando os benefícios conhecidos de manter o pH dos solos em uma faixa adequada), pode-se concluir que, sem um conhecimento adequado do solo, é bastante difícil realizar uma calagem de forma correta.

Para quantificar o cálculo de quantidades de corretivo da acidez a utilizar é necessário conhecer a capacidade de troca de catíons e a sua ocupação com catíons básicos.

6.4. Os catíons trocáveis e a capacidade de troca

A capacidade de troca de catíons (doravante indicada por CTC), é de grande importância na agricultura, pois, é graças a ela que solos retém catíons como cálcio, magnésio, potássio, e outros em menores quantidades, evitando que eles acompanhem as águas de drenagem mas, ao mesmo tempo, mantendo-os em condições de disponibilidade para os vegetais.

A capacidade de troca, em geral medida a pH 7, tem um valor relativamente constante para cada solo ([1]), dentro de condições padronizadas de determinação. É, portanto, uma característica inalterada. a curto prazo, por práticas agrícolas. O que se pode alterar é a relação entre cátions que ocupam a capacidade de troca e é isso que será discutido neste capítulo.

A propriedade de troca de íons existe em inúmeras substâncias naturais ou artificiais. Trocadores de íons são materiais sólidos que apresentam um excesso de carga elétrica, carga esta balanceada por íons trocáveis, de carga contrária, e que ficam adsorvidos na superfície (superfície aqui refere-se à interface sólido-líquido existente em solos em níveis microscópicos). Para que a troca de íons seja possível, os trocadores de íons são em geral materiais porosos.

Como já foi visto, em 3.2. e 3.3.. o solo apresenta-se em geral como um trocador de catíons, valendo dizer que a carga da superfície das partículas é negativa.

A CTC é a quantidade de catíons que um solo é capaz de reter por unidade de peso ou volume. Para fins de química e classificação de solos é comum a expressão por peso de solo. Para fins de fertilidade são comuns ambas as maneiras, mas deve-se dar preferência à expressão por volume.

A quantidade de catíons correspondente à CTC do solo é expressa em miliequivalentes por unidade de peso ou volume de solo. Em fertilidade do solo, utiliza-se a representação em meq/100cm^3 de terra. No caso do catíon, o equivalente é obtido dividindo a massa atômica pela valência. Assim, para 1 meq de K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} e Al^{3+}, são obtidos valores respectivamente de 39,1 mg, 23,0 mg, 20,0 mg, 12,2 mg e 9,0 mg.

A determinação da capacidade de troca de catíons em solos pode ser feita de forma direta ou de forma indireta.

Na determinação direta, percola-se através do solo uma solução salina concentrada (1N), em geral acetato de cálcio ou acetato de amônio a pH 7, e lava-se o excesso de sal, ficando a capacidade de tro-

([1]) Existem diferenças devidas a métodos de determinação, que não cabe aqui discutir. Apenas registre-se o fato.

ca completamente tomada pelo cátion utilizado, cálcio ou amônio. Em seguida extrai-se esse catíon com uma outra solução e determina-se a sua quantidade, que corresponde à CTC.

A determinação indireta consiste em somar as bases trocáveis, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} e Na^{+}, extraídos do solo por soluções salinas ou de ácidos diluídos, com a acidez, H^{+} + Al^{3+}, extraída com uma solução tamponada a pH 7, no Brasil em geral solução 1N de acetato de cálcio.

A troca de catíons é um processo reversível. Além disso, os catíons podem movimentar-se livremente, não ocupando uma posição fixa, já que a atração entre os catíons e a superfície é simplesmente através das cargas, ou seja, do tipo eletrostático.

O hidrogênio, correspondente à acidez potencial do solo e, portanto, não dissociado (reação 6.1.), não participa das reações de troca iônica e não é considerado trocável. Como a acidez ativa em termos quantitativos é insignificante e qualquer hidrogênio livre adicionado em forma de ácido tende a ocupar uma posição de troca que passa a ser não dissociada, liberando um catíon trocável, do ponto de vista prático, para fins de fertilidade do solo, não há necessidade de se considerar a existência de hidrogênio trocável. Isto é principalmente o caso de estudos de troca iônica, como seria o caso da aplicação da equação de Gapon (ítem 3.4.).

Um exemplo do comportamento peculiar do hidrogênio nas reações de troca iônica é encontrado nos processos de extração de bases. Para extrair cálcio e magnésio trocáveis com soluções salinas, como cloreto de potássio ou acetato de amônio, utilizam-se soluções de concentrações elevadas, em geral 1N (1 normal, ou 1 equivalente-grama por litro). Usando ácidos, como ácido clorídrico ou nítrico, soluções apenas 0,05N são igualmente eficientes. Isto porque, pela grande afinidade que o hidrogênio tem com a superfície das partículas do solo, por formar ligações covalentes, resulta a liberação para a solução dos sais, nitratos ou cloretos de cálcio e magnésio.

Contudo, o hidrogênio é incluído na capacidade de troca. Isto só é possível mediante a neutralização da acidez do solo, através de uma reação semelhante a 6.8. ou 6.9., com o que são liberadas cargas negativas. As duas reações seguintes exemplificam o que foi dito.

Se se proceder a extração de um solo com uma solução de cloreto de sódio, a seguinte reação ocorre:

$$\text{Solo}\left|\begin{array}{l}\text{H}\\\text{H}\\\text{Al}\\\text{Ca}\\\text{Mg}\\\text{K}\end{array}\right. + 8\,\text{NaCl} \rightleftharpoons \text{Solo}\left|\begin{array}{l}\text{H}\\\text{H}\\\text{Na}\\\text{Na}\\\text{Na}\\\text{Na}\\\text{Na}\\\text{Na}\\\text{Na}\\\text{Na}\end{array}\right. + \begin{array}{l}\text{CaCl}_2\\\text{MgCl}_2\\\text{AlCl}_3\\\text{KCl}\end{array} \qquad (6.10)$$

Se o cloreto de sódio estiver em grande excesso, a reação tende para a direita e extrai-se praticamente todos os catíons trocáveis, porém o hidrogênio fica no solo. O alumínio trocável que é um catíon ácido, é extraído por uma solução de sal neutro, como cloreto de sódio ou, mais comumente cloreto de potássio. Chama-se de acidez trocável à acidez extraída por esses sais, que exclui, como pode ser visto na equação 6.10., o hidrogênio ([1]).

Para deslocar o hidrogênio é necessário que ocorra a neutralização da acidez. Isto pode-se dar de acordo com a reação

$$\text{Solo}\left|\begin{array}{l}\text{H}\\\text{H}\\\text{H}\\\text{Al}\\\text{Ca}\\\text{Mg}\\\text{K}\end{array}\right. + 3\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Solo}\left|\begin{array}{l}\text{Ca}\\\text{Ca}\\\text{Ca}\\\text{Ca}\\\text{Mg}\\\text{K}\end{array}\right. + \text{Al(OH)}_3 + 3\text{CO}_2 \qquad (6.11)$$

Note-se que a reação 6.11. não é reversível e que não há o aparecimento de sais em solução. O alumínio é insolubilizado na forma de hidróxido e substituído por cálcio, enquanto que o hidrogênio, neutralizado, libera cargas negativas, também ocupadas por cálcio trovável. Os demais catíons trocáveis permanecem como tal.

É de estranhar que por muito tempo o alumínio trocável tenha sido ignorado ao se determinar os catíons trocáveis. É que, tanto em curvas de titulação como as da figura 6.1., como em determinações da CTC, o alumínio pode ser confundido com hidrogênio, sem grandes conseqüências práticas, em vários métodos de determinação de calagem.

([1]) Podem ocorrer pequenas quantidades de hidrogênio em extratos de soluções de KCl 1N. Pelo pH desses extratos a maior parte desse hidrogênio não deve estar dissociado, estando provavelmente na forma de ácidos fracos, liberados do solo no processo de extração.

6.5. Relações entre catíons trocáveis e pH

A figura 6.2. é uma representação esquemática da relação que existe entre os catíons trocáveis e o pH, no caso de um solo com uma importante parte da capacidade de troca representada por hidrogênio. Este hidrogênio, conforme já explicado, precisa ser neutralizado para liberar as cargas que encontram-se não dissociadas, o que se dá com elevação do pH. Por esta razão, nesses casos faz-se referência a cargas dependentes de pH.

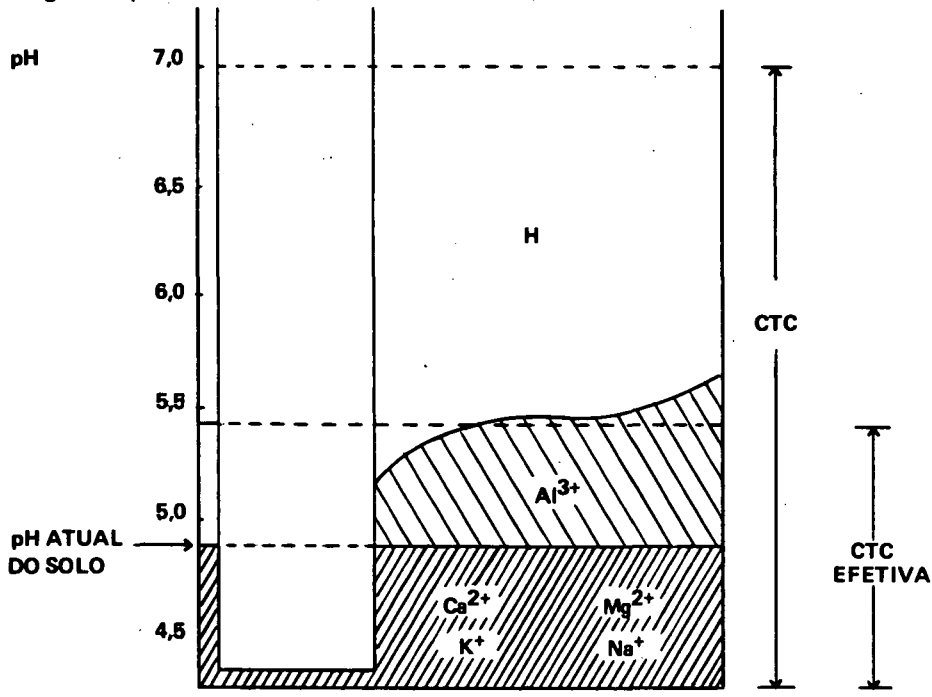

Figura 6.2. A CTC pode ser visualizada como a capacidade de um reservatório, ligado à escala de pH, que indica o nível já atingido pelas bases do solo. Se a acidez do solo for neutralizada, o nível de bases sobe.

Na figura 6.2., a CTC é representada por um reservatório. No fundo estão as bases trocáveis e elas determinam o valor do pH do solo. Acima das bases está o alumínio e acima deste o hidrogênio. Na neutralização da acidez, primeiro é neutralizado o alumínio, que desaparece a valores de pH em torno de 5,5 (valores mais altos para solos arenosos, mais baixos para argilosos).

Note-se que alumínio e bases são trocáveis, de acordo com a reação 6.10. A soma desses catíons tem sido chamada de CTC efetiva, representando a CTC operante no solo em condições naturais.

É preciso cuidado ao ler certos trabalhos porque, quando é feita referência à CTC, pode ser o caso da CTC a pH 7 ou da CTC efetiva. As vezes diz-se que a calagem aumenta a CTC dos solos, o que só pode dizer respeito à CTC efetiva, que realmente aumenta quando a neutralização da acidez ultrapassar os níveis de alumínio da figura 6.2. Note-se que, quando não há mais alumínio no solo, a chamada CTC efetiva pode variar bastante, não sendo uma característica do solo, como o é a CTC a pH 7.

Existe uma representação bastante antiga para os catíons trocáveis, que será utilizada a seguir. A CTC é representada por T e a soma de bases por S. Usava-se também valor H para a acidez potencial, mas isto numa época em que o alumínio era ignorado como componente da acidez. Para evitar confusão, a acidez potencial do solo será representada por H+Al. Pode-se escrever:

$$T = S + H + Al \tag{6.12}$$

$$S = Ca + Mg + Na + K \text{ (1)} \tag{6.13}$$

A parte da CTC ocupada pelas bases trocáveis, expressa em termos de porcentagem, é a saturação em bases, representada por V.

$$V = \frac{100\,S}{T} \tag{6.14}$$

A saturação em alumínio, representada por m, é a porcentagem da CTC efetiva ocupada pelo elemento.

$$m = \frac{Al}{S + Al} \times 100 \tag{6.15}$$

Na tabela 6.1. são mostrados alguns resultados analíticos de solos que exemplificam esses conceitos.

Existem algumas relações muito importantes entre a saturação em bases e o pH, conforme indicado na figura 6.3. O exemplo é de um trabalho realizado há muitos anos. Trabalhos recentes mostram que a correlação é a mesma para outros solos ou mesmo outras regiões. Para fins prático pode-se adotar a equação aproximada

$$pH = 4{,}50 + 0{,}025V \tag{6.16}$$

que facilita a memorização. Por ela, a uma saturação de 40% correspon-

(1) Para facilitar a representação, serão omitidas as cargas elétricas, o que tem sido uma prática bastante comum em diversas publicações.

de um pH de 5,5, e a uma saturação de 60%, corresponde pH 6,0. Não se deve esperar uma aplicação exata da equação, como aliás pode-se deduzir dos dados da tabela 6.1. e da figura 6.3.

Tabela 6.1. Alguns exemplos de resultados analíticos relacionados com a capacidade de troca de catíons e a acidez de solos

Valores determinados no laboratório						Valores calculados			
pH	H+Al	Al	Ca	Mg	K	S	T	V	m
			meq/100cm^3			meq/100cm^3		%	%
5,1	3,0	0,7	0,2	0,1	0,1	0,4	3,4	12	64
5,8	3,0	0,0	2,5	1,6	0,3	4,4	7,4	59	0
4,5	7,8	2,1	0,2	0,0	0,1	0,3	8,1	4	88
5,2	3,2	0,6	0,2	0,1	0,0	0,3	3,5	9	67
5,9	4,5	0,0	4,8	1,0	0,4	6,2	10,7	58	0
5,0	6,1	1,1	0,4	0,2	0,1	0,7	6,7	10	61
5,5	2,3	0,1	1,8	0,7	0,3	2,8	5,1	55	3
4,6	16,5	1,9	0,4	0,1	0,2	0,7	17,2	4	73

Fonte: Raij, B. van et al. Bragantia 38: 57–69, 1979.

Uma correlação bastante importante em trabalhos de pesquisa, principalmente para experimentação visando selecionar cultivares tolerantes a alumínio, é a que existe entre saturação em alumínio e pH, ilustrada na figura 6.4. Confrontando as figuras 6.3. e 6.4. percebe-se que com a saturação de alumínio só se opera em menos da metade da CTC, o que limita a utilização da correlação na prática da calagem, pois, há interesse na faixa correspondente a valores de pH acima de 5,5

6.6. Métodos de laboratório para a determinação da necessidade de calagem

6.6.1. Conceituação da necessidade de calagem

Necessidade de calagem é a quantidade de corretivo da acidez necessária para neutralizar a acidez do solo, de uma condição inicial até uma condição desejada.

Para facilitar a discussão, o corretivo tomado como padrão é o carbonato de cálcio $CaCO_3$, finamente moído, atribuindo-se a ele um valor de 100. Qualquer outro corretivo terá sua eficiência (ou poder relativo de neutralização total, PRNT) expresso em termos de equivalente $CaCO_3$.

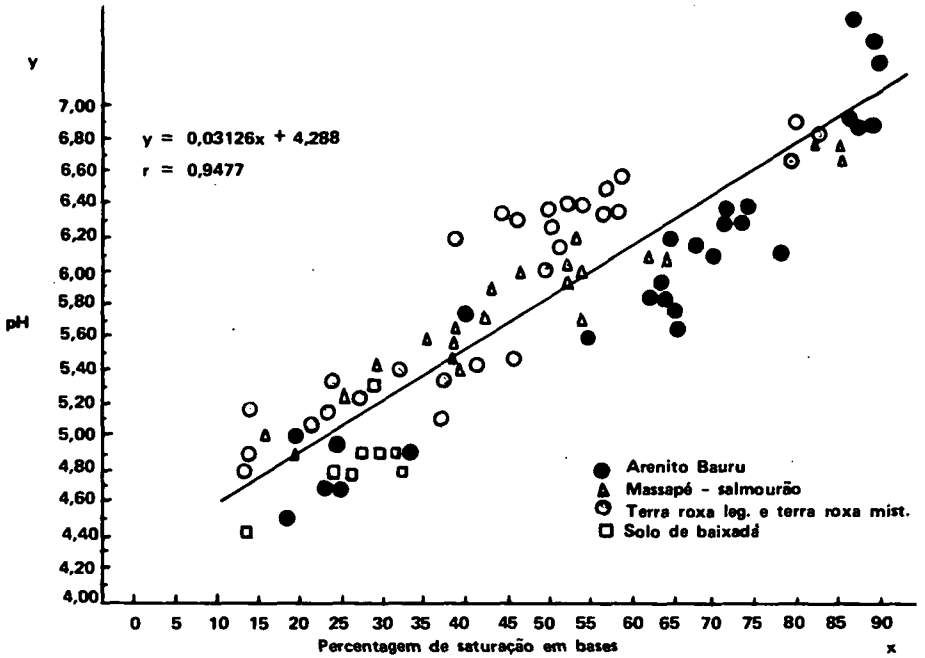

Figura 6.3. Relacão entre o pH e a porcentagem de saturação em bases de 65 amostras de solos do Estado de São Paulo.
Fonte: Catani & Gallo (1955).

O carbonato de cálcio apresenta uma coincidência numérica que muito facilita os cálculos de necessidade de calagem. Um milequivalente de $CaCO_3$, que pesa 0,050g, por 100cm³ de terra, corresponde a 1 t/ha para uma camada de 20cm.

A condição desejada de correção da acidez depende do objetivo que se pretende atingir e da metodologia utilizada, além das culturas. Isto será abordado nos próximos ítens.

Fator de calagem é o número pelo qual se multiplica a necessidade de calagem teórica para indicar o quanto deve ser aplicado ao solo de um determinado calcário. Para o Estado de São Paulo, um valor médio do PRNT dos calcários comercializados determinados foi de 67%. Portanto, o fator de calagem para a aplicação desses materiais é de 100/67 = 1,5. Portanto, para cada 1 meq/100cm³ de terra de acidez, ou necessidade de calagem teórica de 1 t/ha, deve-se aplicar 1,5 t/ha dos calcários comerciais.

Existem vários métodos de determinação da necessidade de calagem em solos. Em uso nos laboratórios de rotina de análise de solo

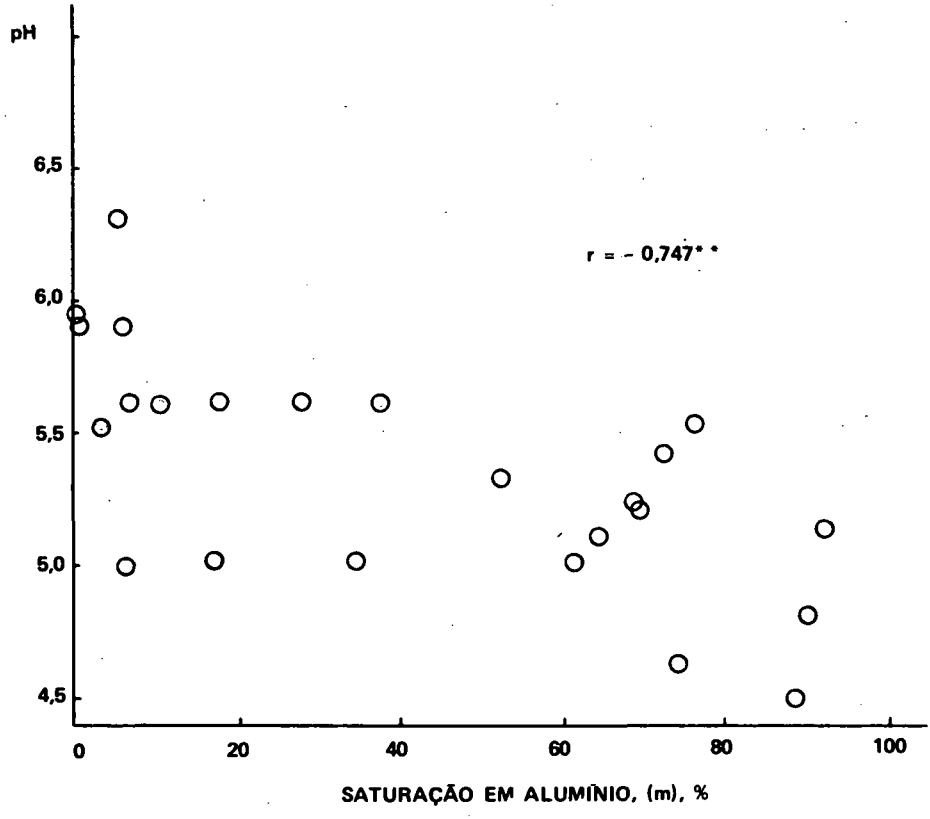

Figura 6.4. Relação entre a saturação em alumínio e o pH de solos ácidos.
Fonte: Os dados para cálculos foram tirados de Raij, B. van et al. **Bragantia 38: 57-69, 1979.**

do Brasil existem três, além de algumas variações locais para os mesmos métodos.

Não se inclui sob o tema necessidade de calagem, exceto no ítem 6.6.4., considerações sobre cálcio e magnésio como nutrientes. A discussão destes é feita em conjunto com potássio.

6.6.2. Incubação com carbonato de cálcio

Consiste na obtenção de curvas com as da figura 6.1.. Para isso adicionam-se a várias amostras de um solo, quantidades crescentes de $CaCO_3$ e incubam-se as amostras, por vários dias, com um teor de umidade não excedendo a capacidade de campo. Se o corretivo utiliza-

do for finamente dividido, como é o caso de $CaCO_3$ reativo analítico, e a mistura com o solo for bem feita, um equilíbrio aparente pode ser conseguido em poucos dias. O tempo de incubação em experiências de laboratório, tem variado de algumas horas até alguns anos, dependendo na finalidade da determinação.

Algumas variações podem ser feitas, como adicionar hidróxido de cálcio ao solo ou carbonato de cálcio, mas em suspensões de solo e água que são agitadas por várias horas.

Após a incubação é lido o pH, obtendo-se curvas do tipo das apresentadas na figura 6.1. É importante que o pH seja lido nas condições em que ele é determinado rotineiramente, em geral com relação de solo:água de 1:2,5. Se a incubação for muito prolongada, de mais de alguns dias, é necessário lavar os sais do solo, que se formam devido à mineralização da matéria orgânica. Se esses sais não forem removidos, os resultados de pH serão muito baixos.

O método de incubação com $CaCO_3$ não é prático para uso rotineiro, sendo mais usado em trabalhos de pesquisa e, principalmente, para aferir os outros métodos. De curvas como as da figura 6.1., pode-se obter a necessidade de calagem para atingir qualquer valor de pH.

6.6.3. Elevação da saturação em bases

Para cálculos são necessários os valores de H+Al, Ca, Mg e K e as equações 6.12., 6.13. e 6.14. O cálculo da necessidade de calagem para elevar a saturação em bases é simples. A equação 6.14. permite escrever:

$$V_2 - V_1 = \frac{100\,(S_2 - S_1)}{T} \qquad (6.17)$$

S_2 e V_2 representam, respectivamente os valores, da soma de bases e a da saturação em bases que se pretende atingir, sendo S_1 e V_1 os valores iniciais.

Já foi dito que 1 meq/100cm³ de terra corresponde a 1 t/ha x 20cm de $CaCO_3$. Portanto, $S_2 - S_1$ pode ser tomado como a diferença em bases a adicionar ao solo, ou seja, a necessidade de calagem. Com esta consideração, rearranjando a equação 6.17., obtém-se:

$$\text{Necessidade de calagem} = \frac{(V_2 - V_1)\,T}{100} \qquad (6.18)$$

As determinações de laboratório para este método são bem conhecidas. O valor de H+Al corresponde à acidez extraída com solu-

ção 1N de acetato de cálcio a pH 7. Trata-se de uma solução tamponada e, por esta razão, ela extrai o hidrogênio não dissociado do solo representado na figura 6.2. acima do alumínio. Cálcio, magnésio e potássio são facilmente extraídos de solos por soluções salinas ou de ácidos fortes diluídos, sem haver praticamente diferenças para diferentes métodos de extração.

Para calcular a necessidade de calagem para elevar a saturação em bases, é preciso saber até quanto se quer chegar, ou seja, qual o valor desejado de V_2 na equação 6.18.

Para isto é necessário voltar para à figura 6.3., que apresenta a correlação entre a saturação em bases e o pH de solos. A relação entre as duas variáveis é tão estreita que falar em elevar a saturação em bases significa falar em elevar o pH. Considerando a equação 6.16., pH = 4,50 + 0,025 V, em média para elevar o pH a 5,5 seria necessária uma saturação em bases de 40% e para elevar o pH a 6,0, a saturação em bases deveria ser de 60%.

As culturas e os cultivares dentro de uma mesma cultura, variam em tolerância à acidez e, portanto, as necessidades de calagem irão variar. Contudo, do ponto de vista prático não é viável um ajuste muito rigoroso do pH para cada caso. É necessário fixar metas a atingir com a calagem.

A figura 6.5. mostra exemplos de diversas culturas que respondem bem à calagem. Note-se que são apresentados apenas resultados do primeiro ano e via de regra os efeitos da calagem manifestam-se por muitos anos após a aplicação.

Com base nas informações da figura 6.5. e de ensaios de calagem ainda não publicados deverá ser introduzido futuramente no Estado de São Paulo um critério para calcular a necessidade de calagem baseado na elevação da saturação em bases. Os cálculos se farão visando a elevação a 60% para as culturas mais exigentes e 40% para as culturas mais tolerantes à acidez, níveis que correspondem aproximadamente e, respectivamente, a valores de pH de 6,0 e 5,5.

Note-se que o pH não é envolvido nos cálculos (equação 6.18.), utilizando-se a correlação expressa pela equação 6.16. apenas para indicar os valores aproximados do pH que deverão ser obtidos.

No mesmo Estado foi utilizado anteriormente um método para estimar a necessidade de calagem com base na correlação da figura 6.3. Na ocasião, os cálculos de calagem eram realizados para elevar o pH a 6,5 (Catani & Gallo, 1955). Alguns laboratórios usam este critério atualmente.

Prefere-se agora sugerir o cálculo através da saturação em bases, por constituir um critério analítico mais seguro.

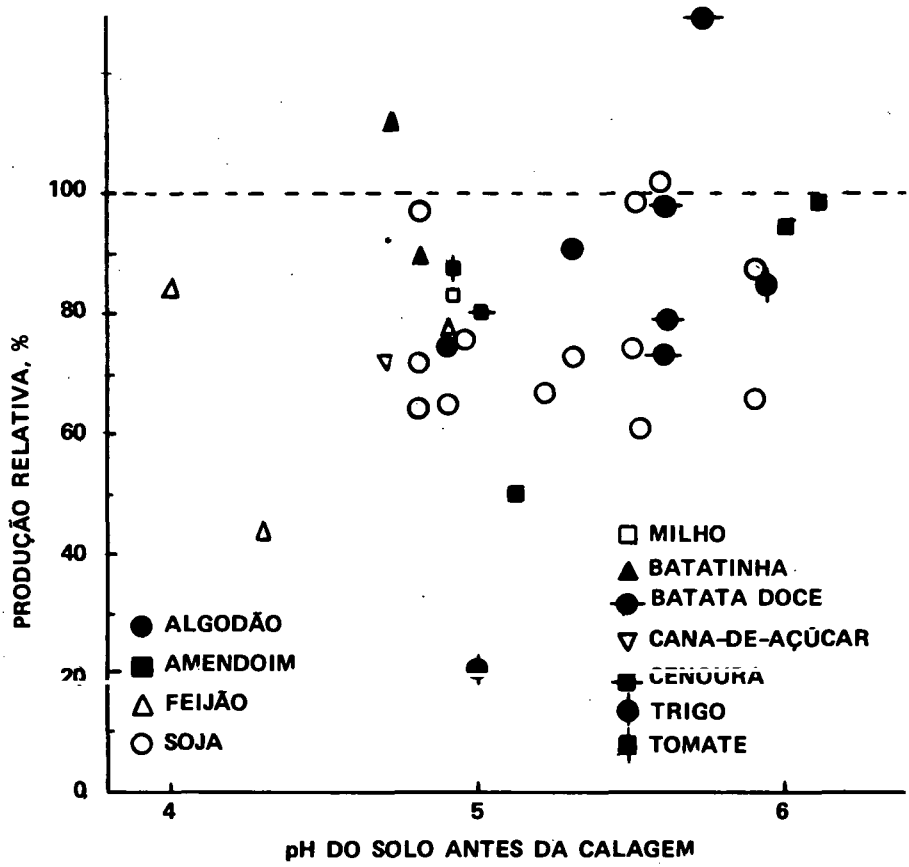

Figura 6.5. Relação entre respostas de culturas à calagem, expressas em produções relativas, e o pH de solos. São apresentados apenas os efeitos do primeiro ano de aplicação de calcário. Todos os casos são do Estado de São Paulo.
Fonte: Os resultados utilizados foram publicados em Bragantia, sendo os seguintes os números, anos de publicação e primeiras páginas dos artigos consultados: 19 (1960): 667, 675, XXXV; 20 (1961): 617; 21 (1962): 325, 617, 777, 867; 23 (1964): 45; 24 (1965): 51, 83; 25 (1966): 145, 223; 26 (1967): 143, 303; 27 (1968): 279; 281 (1969): 71, XVII; 29 (1970): 59, 81; 30(1971): 39; 33 (1974): LVII; 36 (1977):117.

6.6.4. Neutralização de alumínio e elevação de cálcio e magnésio

A idéia de ser o alumínio trocável dos solos o principal componente negativo relacionado à acidez dos solos, levou ao desenvolvi-

mento de um critério de determinação de calagem baseado na neutralização do alumínio.

O cálculo das quantidades a aplicar é muito simples. A necessidade de calagem, em t/ha de $CaCO_3$ é igual a 1,5 x Al. Note-se que 1,5 não é o fator de calagem descrito em 6.6.1. Trata-se de um outro fator, necessário porque devido a imperfeições na mistura de corretivos com solos, ocorre neutralização de hidrogênio antes que todo o alumínio seja neutralizado.

Também cuida-se, em alguns casos, de calcular a calagem visando diminuir a saturação de alumínio, definida pela equação 6.15., a valores considerados aceitáveis. Trata-se de um critério interessante para solos que têm teores muito elevados de alumínio e apenas uma pequena proporção de hidrogênio na CTC do solo. É uma condição bastante rara nos solos brasileiros. O critério é útil para estudos de melhoramento de plantas visando a tolerância a alumínio.

Existem solos que apresentam teores baixos de alumínio, mas também não contém muito cálcio e magnésio. Nesses casos é adotada em São Paulo a prática de adicionar calcário ao solo para elevar os teores de cálcio e magnésio, a um mínimo de 2 meq/100cm^3 para solos mais arenosos (matéria orgânica até 2%) ou 3 meq/100cm^3, para solos com teores de matéria orgânica acima de 2%. Outros estados usam procedimento similar.

Para calcular a quantidade de calcário a aplicar para elevar cálcio e magnésio, basta subtrair de 2 ou 3 os teores desses elementos existentes no solo, obtendo-se diretamente as quantidades de $CaCO_3$ a aplicar.

Os critérios de neutralização de alumínio e de elevação de cálcio e magnésio devem ser aplicados concomitantemente e o maior dos dois valores será a quantidade a aplicar. Isto porque, ao neutralizar o alumínio, ocorre a elevação de cálcio e magnésio e vice-versa. Deve-se, também, considerar o fator de calagem do corretivo a utilizar.

6.6.5. Uso do tampão SMP

O uso de soluções tampão para a determinação da necessidade de calagem de solos é bastante comum, consistindo em geral em métodos rápidos e precisos.

Nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina é utilizado o tampão SMP (de Shoemaker, McClean e Pratt, autores do método). A solução tampão SMP foi idealizada de tal forma que a sua curva de neutralização com ácido é uma reta em uma considerável faixa de pH.

O princípio de uso de soluções-tampão para a determinação da necessidade de calagem em solos é bastante simples. Adiciona-se a

Tabela 6.2. Tabela para determinação de calagem de solos com base no pH lido na solução SMP em mistura com solo

pH da suspensão	Necessidade de calagem para pH		
Solo: solução SMP	6,0 a 6,5 (RS)	6,5 (SP)	6,0 (SP)
	$CaCO_3$, meq/100cm^3 ou t/ha x 20cm		
6,9	–	0,4	–
6,8	0,3	0,8	–
6,7	0,5	1,2	0,3
6,6	0,8	1,5	0,5
6,5	1,2	2,0	0,7
6,4	1,6	2,3	0,9
6,3	2,0	2,8	1,1
6,2	2,4	3,3	1,4
6,1	3,0	3,8	1,8
6,0	3,4	4,5	2,2
5,9	3,9	5,2	2,7
5,8	4,4	6,1	3,2
5,7	5,2	6.9	3,9
5,6	6,0	7,9	4,4
5,5	7,0	8,9	5,1
5,4	8,0	10,1	5,8
5,3	9,0	11,2	6,7
5,2	10,4	12,5	7,6
5,1	11,6	13,8	8,5
5,0	13,2	15,3	9,5
4,9	15,0	16,7	10,5
4,8	17,0	18,3	11,6

Fontes: Mielniczuk, J. & et al. Boletim técnico n.º 2, Fac. Agronomia e Veterinária U.F.R.G.S., 1969.
Raij B. van & et al. Bragantia 38:57-69, 1979.

uma quantidade de solo um volume da solução-tampão e agita-se. Estabelece-se o equilíbrio. É lido o pH da suspensão, em geral representado por pHSMP. Quanto maior for a acidez potencial do solo, maior será a depressão de pH da solução tampão em contato com o solo.

A calibração do método é feita correlacionando o pH SMP de uma série de solos com a necessidade de calagem para elevar o pH, em geral a 6,5, 6,0 ou mesmo 5,5, sendo essa necessidade de calagem determinada por incubação com $CaCO_3$, como descrito em 6.6.2. Obtém-

se tabelas como as mostradas na tabela 6.2. De posse dessas tabelas, que devem ser preparadas regionalmente, lê-se diretamente a necessidade de calagem à partir do pHSMP e sempre que o pH do solo estiver abaixo do especificado. As diferenças registradas para o Rio Grande do Sul e São Paulo são devidas, em parte a diferenças entre solos das duas regiões e, também, a pequenas diferenças nas execuções analíticas.

6.6.6. Métodos semi-empíricos

Em diferentes regiões sempre houve uma tendência ao estabelecimento de tabelas semi-empíricas, baseadas no conhecimento dos solos da região e o seu comportamento na prática de calagem. Para construir tais tabelas pode-se lançar mão de diferentes parâmetros, incluindo o pH do solo, o teor de argila, o teor de matéria orgânica e os teores de cálcio e magnésio.

Se é possível obter uma análise de solo realizada em laboratório, pouco se justifica usar tais métodos. No caso de se fazer determinação de pH no campo, por método colorimétrico, acompanhado de avaliação da textura, pode-se em princípio recorrer a um método prático. Contudo é necessário muito cuidado e não aplicar doses elevadas, que podem ocasionar prejuízos.

De uma forma geral, com a rede de laboratórios de análise de solo que hoje existe no País, e pelo baixo custo da análise de solo, pouco se justifica o emprego de tais métodos para determinar a necessidade de calagem.

6.7. **Escolha do método**

Considerando os três métodos para determinação da necessidade de calagem praticados pelos laboratórios de análise de solo do País, descritos em 6.6.3., 6.6.4. ou 6.6.5., qual deve ser preferido?

Não é uma pergunta fácil de responder pois o efeito da calagem em culturas varia não só com o solo, mas com a espécie vegetal (ou cultivar), com o nível de manejo geral e, as vezes, por causa de fatores não bem determinados. Isto porque, além dos diversos benefícios da calagem, tais como neutralização de alumínio e manganês tóxicos, aumento dos teores de cálcio e magnésio, aumento de disponibilidade de fósforo ou molibdênio, aumento da nitrificação ou da fixação de nitrogênio e até de melhoria de propriedades físicas de alguns solos, ela pode apresentar efeitos desfavoráveis, tais como diminuição de alguns micronutrientes ou de potássio. É muito difícil na experimentação com

calagem estabelecer exatamente o que está em jogo. Contudo, a pesquisa tem indicado ser a calagem necessária para inúmeras culturas e exemplos foram resumidos na figura 6.5.

Do ponto de vista de química de solo, a neutralização do alumínio dos solos elevaria o pH dos solos por volta de pH 5,5 (figuras 6.2. e 6.4.), enquanto que pelo tampão SMP pretende-se um pH de 6,0 ou 6,5 e pelo método de saturação em bases, de 6,0 ou 5,5 (antigamente pretendia-se 6,5). Portanto, as diferenças de pH variam de 0,5 a 1,0.

Comparando as recomendações de calagem dos estados sulinos, que são frequentemente mais elevadas, que nas outras regiões do País, pode-se ter a impressão que isto se deve ao uso do método do tampão SMP, já que nas outras regiões se usa principalmente o critério do alumínio. Embora isto em parte seja a causa das diferenças, a razão principal está na própria natureza dos solos de regiões mais frias, que tem maior CTC e maiores teores de alumínio trocável.

Além desse aspecto, a calagem, tal como acontece com os nutrientes, principalmente os imóveis, produz curvas de resposta do tipo dos retornos decrescentes (ítem 4.4.). Na prática isto significa que acima de pH 5,5 os retornos devidos à calagem, mesmo para as culturas mais exigentes com relação a esta prática, não são mais espetaculares, embora ainda altamente interessantes do ponto de vista econômico, principalmente por causa do longo efeito residual. Os resultados da figura 6.5. indicam claramente que a utilização de calagens, mais elevadas do que as hoje praticadas na maior parte do País, poderia contribuir consideravelmente para a elevação da produtividade de diversas culturas.

7. FÓSFORO

7.1. Formas no solo

O fósforo é um elemento de muito baixa mobilidade no solo, no qual encontra-se como ortofosfatos, que são formas derivadas do ácido ortofosfórico, H_3PO_4.

Na fase sólida do solo, o fósforo encontra-se combinado em compostos de ferro, alumínio e cálcio e na matéria orgânica. A importância relativa dos compostos inorgânicos de fósforo no solo é condicionada pelo pH e tipo e quantidade de minerais existentes na fração argila. Em solos ácidos, com predomínio de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, são mais importantes as combinações de fósforo com ferro e alumínio, enquanto que em solos neutros ou calcários, aparecem fosfatos de cálcio de ordem elevada e baixa solubilidade.

Como reflexo da baixa solubilidade do composto de fósforo, são baixos os teores de fósforo na solução do solo, raramente atingindo 0,1 ppm (partes por milhão), sendo em geral muito mais baixos. A forma predominante em solos ácidos é o íon $H_2PO_4^-$, aparecendo em menores proporções o íon HPO_4^{2-}, que ocorre em proporções crescentes a medida que o pH aumenta.

Em solos que receberam adubações fosfatadas, há também a formação de compostos de ferro, alumínio e cálcio e, através do ciclo biológico, de fosfatos orgânicos. Os fosfatos inorgânicos podem ser considerados em parte, adsorvidos na superfície, porém, conforme foi visto em 3.5., trata-se de uma adsorção química, com o mesmo tipo de ligações que ocorrem nos compostos de fósforo. Portanto, é uma adsorção que nada tem a haver com a que ocorre nos processos em que prevalece a troca de íons, já discutida.

Do ponto de vista de nutrição de plantas o problema pode ser visualizado de forma diferente. Se um fertilizante sólido for adicionado

ao solo, pode-se imaginar um comportamento como o exemplificado na figura 7.1. Optou-se por um exemplo com fertilizante, porém parte da explicação que será dada serve também para solos não adubados.

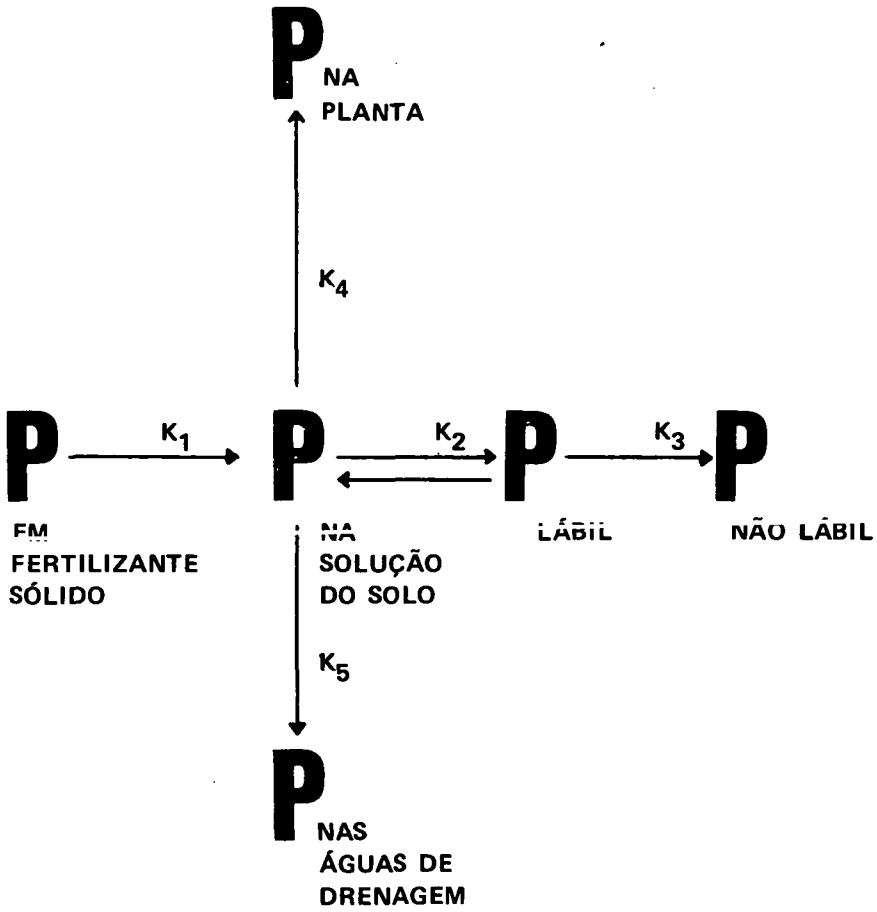

Figura 7.1. Comportamento de fósforo em solo adubado, com relação aos aspectos que afetam a nutrição vegetal.
Adaptado de Larsen, S. HMSO, Londres, Tech. Bull. 20: 34-41, 1971.

O fosfato adicionado ao solo como fertilizante dissolve-se, passando para a solução do solo. Devido à baixa solubilidade dos compostos de fósforo e a forte tendência de adsorção pelo solo, a maior

parte do fósforo passa para a fase sólida, onde fica em parte como fosfato lábil, que gradativamente passa a fosfato não lábil. O fosfato lábil pode redissolver caso haja abaixamento do teor em solução, para manutenção do equilíbrio. O abaixamento do teor em solução dá-se principalmente por absorção pelas plantas. Devido aos baixos teores de P em solução, remoções pelas águas de percolação são mínimas.

Há casos de fertilizantes fosfatados que dissolvem lentamente no solo ou não dissolvem. Como exemplo podem ser citados certos fosfatos naturais. Nesses casos, o P fertilizante da figura 7.1. permanece no solo, podendo influir no método de determinação de fósforo, como será visto posteriormente.

Note-se que a referência a fosfatos lábeis e não lábeis não conflita com as formas inorgânicas de fósforo ligado a cálcio, ferro e alumínio. Qualquer uma dessas formas, pode-se encontrar em formas mais ou menos lábeis, dependendo principalmente do tempo de formação dos fosfatos e das condições existentes, que podem favorecer mais ou menos o «envelhecimento» ou retrogradação a formas não lábeis, que dissolvem com dificuldade.

7.2. **Disponibilidade**

As plantas absorvem fósforo da solução do solo. Portanto o único fósforo que está disponível imediatamente é o fósforo em solução.

Contudo, os teores em solução são muito baixos. Se for admitido um exemplo, com uma concentração em solução de 0,1 ppm, em um solo com 25% de água, a quantidade em solução, na camada arável, será de apenas 50g de P, portanto insuficiente para suprir as necessidades de uma cultura. Isto significa que deve haver uma constante reposição do fósforo em solução, o que se dá através da dissolução do fosfato lábil, que está em equilíbrio com o fósforo em solução, conforme indicado na figura 7.1.

Portanto, algo mais que o fósforo em solução deve ser considerado para caracterizar a disponibilidade do nutriente.

O conceito de fosfato lábil é tão importante para caracterizar o comportamento de fósforo no solo, que vale a pena ilustrá-lo com mais uma figura. A figura 7.2. mostra a existência no solo de muito pouco fósforo em solução, um pouco mais como fosfato lábil e a maior parte como fosfato não lábil. Embora seja apenas uma ilustração, ela tem muita relação com a realidade. Solos podem apresentar centenas a milhares de quilogramas de fósforo total na camada arável e, mesmo as-

sim, apresentarem-se deficientes no elemento para as culturas. A figura 7.2. está, também, de acordo com o fato conhecido de serem necessárias muitas vezes mais fósforo nas adubações do que as plantas retiram.

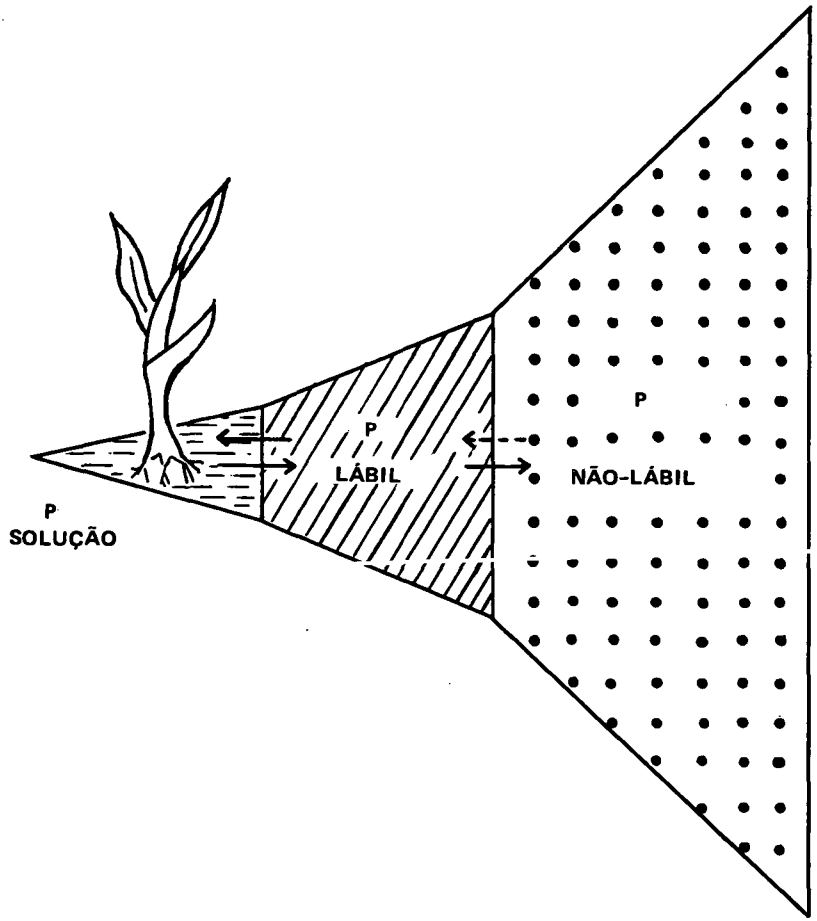

Figura 7.2. Diagrama mostrando a relação entre as frações de fósforo não-lábil e lábil, e o fósforo na solução do solo.
Adaptado de ISMA. Handbook on phosphate fertilization, 1978.

Note-se que o termo «fixação», tão usado quando se trata de fósforo, não foi ainda utilizado neste capítulo. É que ele tem sido usado para indicar o fósforo adicionado ao solo em solução que passou para a fase sólida. Pelas figuras 7.1. e 7.2. percebe-se que, do fósforo na fase sólida, parte continua disponível.

Na realidade, para caracterizar a disponibilidade do fósforo, o conceito de «fixação» tem confundido mais do que ajudado.

É importante compreender o que acontece quando é adicionada uma grande quantidade de fosfato solúvel em água ao solo. Há inicialmente um grande aumento da quantidade de fosfato lábil e do fosfato em solução. O fosfato lábil consiste principalmente de formas adsorvidas. Com o tempo há um envelhecimento do fosfato lábil, que vai adquirindo uma constituição mineralógica mais estável e de mais difícil solubilização. Consequentemente, com o passar do tempo, medido em anos, a quantidade de fosfato lábil diminui. Em outras palavras, fosfatos solúveis adicionados ao solo, apresentam a sua eficiência diminuída com o passar do tempo.

As plantas absorvem o fósforo da solução do solo, onde este encontra-se em concentrações muito baixas. Decorre daí que a extensão do sistema radicular é de fundamental importância na absorção do elemento. Por maior que seja essa extensão o volume de solo próximo das raízes é apenas uma pequena fração do total. Com a absorção do fósforo ocorre uma depleção de fósforo da solução em torno das raízes. Para que a absorção continue, o elemento deve dissolver da fase sólida e movimentar-se, por difusão, até a superfície das raízes. Esta difusão é afetada por diversas propriedades de solos, que podem facilitar ou diminuir a sua intensidade.

Do ponto de vista conceitual podem ser reconhecidos quatro fatores que definem a disponibilidade de fósforo no solo: a) o fator intensidade, representado pela concentração de fósforo na solução do solo (ou atividade, para maior rigor); b) o fator quantidade, representado pelo fósforo lábil; c) o fator capacidade ou, também, poder tampão de fósforo, representado pela condição do solo de poder manter ou restabelecer o fósforo em solução, em níveis adequados, através da dissolução do elemento da fase sólida; e, d) o fator difusão, representado pelas características que permitem aos íons fosfato migrar da superfície da fase sólida do solo, onde se dissolvem, até a superfície das raízes. O mais importante dos quatro é o fator quantidade.

Do ponto de vista prático, a determinação desses fatores ou mesmo a sua definição operacional, em termos de uma metodologia exeqüível de determinação, esbarra em barreiras de difícil transposição.

Além disso, existem diferenças entre espécies vegetais em aproveitar o fósforo do solo. Algumas diferenças são simples de entender. Assim, plantas de crescimento muito rápido e sistema radicular pouco desenvolvido, aproveitam mal o fósforo do solo e necessitam teores disponíveis elevados. Já plantas de ciclo longo e sistemas radiculares muito desenvolvidos, aproveitam bem teores relativamente baixos de P disponível. Existem também algumas características de espécies vegetais que favorecem o melhor aproveitamento de fósforo, tais como maior capacidade de absorção de cálcio, capacidade das raízes de aci-

dificarem a rizosfera, infecção com micorrizas que aumentam a superfície de absorção das raízes, e outras.

A conseqüência dessa situação complexa do comportamento do fósforo, é a necessidade dos aspectos práticos de métodos de análise de fósforo, principalmente estabelecimento de correlações e calibrações, contarem sempre com uma sólida base de experimentos de campo.

7.3. **Métodos de determinação**

Existe uma variedade muito grande de métodos de extração de fósforo de solos, o que não deixa de ser um reflexo da complexidade do comportamento do elemento. Como ponto de partida para leituras detalhadas, sugere-se os artigos de Thomas e Peaslee (1973) e Raij (1977).

Para nenhum outro nutriente, existem tantos trabalhos dedicados a métodos de extração. Soluções das mais diversas têm sido tentadas, incluíndo água, soluções tamponadas de ácidos fracos, soluções diluídas de ácidos fortes, soluções tamponadas de bases e soluções de sais diversos, isto com várias combinações de concentrações, pH, relações de solução para solo, tempos de agitação, etc. Cada mudança na técnica de extração leva a resultados diferentes. Isto faz com que haja a necessidade de padronizar cada método de extração e calibrá-lo regionalmente. Quando isto é feito, pode-se chegar a soluções bem razoáveis do ponto de vista prático.

No Brasil são usados dois extratores para fósforo: o ácido sulfúrico 0,05**N** (H_2SO_4 0,05**N**) e o duplo ácido, constituído de ácido sulfúrico 0,025**N** em ácido clorídrico 0,05**N** (H_2SO_4 0,025N + HCl 0,05N).

O primeiro foi desenvolvido no Instituto Agronômico de Campinas (Catani & Gargantini, 1954), recomendando a extração de 4g de terra com 100ml de H_2SO_4 0,05**N**. A partir de 1965 este extrator passou a ser usado na proporção de 10cm^3 de terra e 100ml de solução. Ele é utilizado nos laboratórios do Estado de São Paulo e tem sido chamado de método IAC.

O extrator H_2SO_4 0,025N + HCl 0,050N foi desenvolvido por Mehlich e é descrito em um trabalho mimeografado, segundo Thomas & Peaslee (1973). Ele passou a ser usado no Brasil à partir de 1965, com exceção do Estado de São Paulo, na proporção de 10cm^3 de terra e 100 ml de solução. Ele tem sido chamado de método Mehlich ou Carolina do Norte.

Os dois extratores de fósforo em uso no País fornecem praticamente resultados iguais. É uma coincidência, considerando que resultados de fósforo obtidos com diferentes extratores via de regra dife-

rem e, também, que os dois extratores tem origem independente. Em termos práticos isto significa que são comparáveis os resultados de fósforo obtidos em diferentes laboratórios brasileiros.

Os resultados analíticos têm sido expressos em ppm (partes por milhão) ou μg/ml (microgramas por ml), que também se equivalem. São inconvenientes e superadas as representações em mg de P_2O_5 por 100g de terra ou meq de PO_4^{3-} por 100ml de terra.

Extratores ácidos como os mencionados extraem mais fósforo ligados a cálcio no solo e apenas as partes mais solúveis de fósforo ligado a ferro e alumínio.

Em solos ricos em óxidos de ferro e alumínio o produto final, da reação de fosfatos solúveis das adubações com solos, são fosfatos de ferro e alumínio. Tendo em vista isto, outros extratores têm sido testados em trabalhos de pesquisa, que seriam mais específicos para essas formas de fósforo. Dois métodos muito importantes, utilizados em outros países, são o método Olsen, que utiliza a extração com solução 0,5**N** de bicarbonato de sódio a pH 8,5, e o método Bray I, que utiliza a extração com fluoreto de amônio 0,03N em ácido clorídrico 0,025**N**. Contudo, não foi demonstrada a superioridade desses métodos em relação aos extratores atualmente usados.

Os extratores ácidos atualmente em uso têm um sério problema que os métodos Bray I e Olsen não tem. Eles dissolvem resíduos de fosfatos naturais, ou seja, P fertilizante da figura 7.1., uma forma que, se não dissolveu no solo, tem pouco a ver com o fósforo disponível. A conseqüência é a obtenção de resultados excessivamente elevados em alguns solos que receberam aplicações recentes de fosfatos naturais. Esses adubos vem sendo utilizados em rítmo crescentes na região cetral do País.

Outro problema dos extratores ácidos é o fornecimento de resultados excessivamente baixos de P em certos solos argilosos, que vem sendo adubados com fósforo e nos quais as culturas produzem bem e pouco respondem à adubação fosfatada.

Do ponto de vista de nutrição de plantas, seria desejável um extrator que determinasse o fosfato lábil. Os métodos IAC e Mehlich provavelmente extraem parte dos fosfatos lábeis dos solos, mas podem extrair formas não lábeis, como é o caso de resíduos de fosfatos naturais, já mencionados.

Do ponto de vista dos quatro fatores que definem a disponibilidade de fósforo no solo, os métodos em uso fornecem mais uma estimativa do fator quantidade e, talvez, capacidade. Isto é razoável, lembrando-se que, dos quatro fatores de disponibilidade de fósforo no solo, o fator quantidade é o mais importante.

Um método que parece ter perspectivas interessantes para determinar fósforo no solo é o que utiliza na extração uma resina troca-

dora de aníons. O solo é agitado em água com a resina e o fósforo passa do solo para a resina, através de água:

$$P\ solo \rightarrow P\ solução \rightarrow P\ resina \qquad (7.1)$$

Note-se que é um caminhamento igual ao que ocorre na absorção pelas raízes, quando o fósforo sai da fase sólida do solo para a solução e daí para a raiz.

Após a extração pela resina, o fósforo é removido dela e determinado. Pelo mecanismo de extração é de supor-se que somente o fósforo lábil seja extraído pela resina, já que não é incluído nenhum extrator químico de ação específica sobre alguma determinada forma de fósforo. Contudo, o método da resina também é afetado por variáveis na extração, principalmente pelo tempo de agitação.

A pesquisa de extratores de fósforo mais eficientes vem sendo feita em várias instituições brasileiras. É possível que seja conseguida uma alternativa melhor do que os métodos em uso, que são apenas razoáveis.

7.4. **Correlação e calibração**

É preciso considerar dois sistemas de adubação fosfatada em uso no País, baseadas em adubações de manutenção ou de correção do solo e manutenção. As filosofias dos dois sistemas são diferentes e, por essa razão, os dois casos são tratados separadamente.

7.4.1. Adubação de manutenção

O sistema de adubação de manutenção é o mais tradicional e o de uso mais generalizado no País. Consiste na aplicação localizada dos adubos fosfatados, para muitas culturas anuais 5cm abaixo e 5cm ao lado das sementes. É a forma mais eficiente de aplicação de fosfatos solúveis em água.

As correlações entre teores no solo e respostas à adubação fosfatada são estabelecidas, utilizando os resultados de fósforo no solo e os valores de produção relativa, de acordo com o que foi explicado no ítem 5.3.4. A amostra composta para análise de fósforo é retirada da gleba do ensaio antes da instalação deste. Note-se que isto equivale ao que deve fazer o agricultor, ou seja, retirar a amostra antes da instalação da cultura.

Ensaios de adubação de vários tipos têm sido usados para a finalidade aqui descrita. Com mais freqüência são ensaios utilizados pa-

ra estudar as adubações com nitrogênio, fósforo e potássio. Exemplos para algumas culturas são apresentados na figura 7.3.

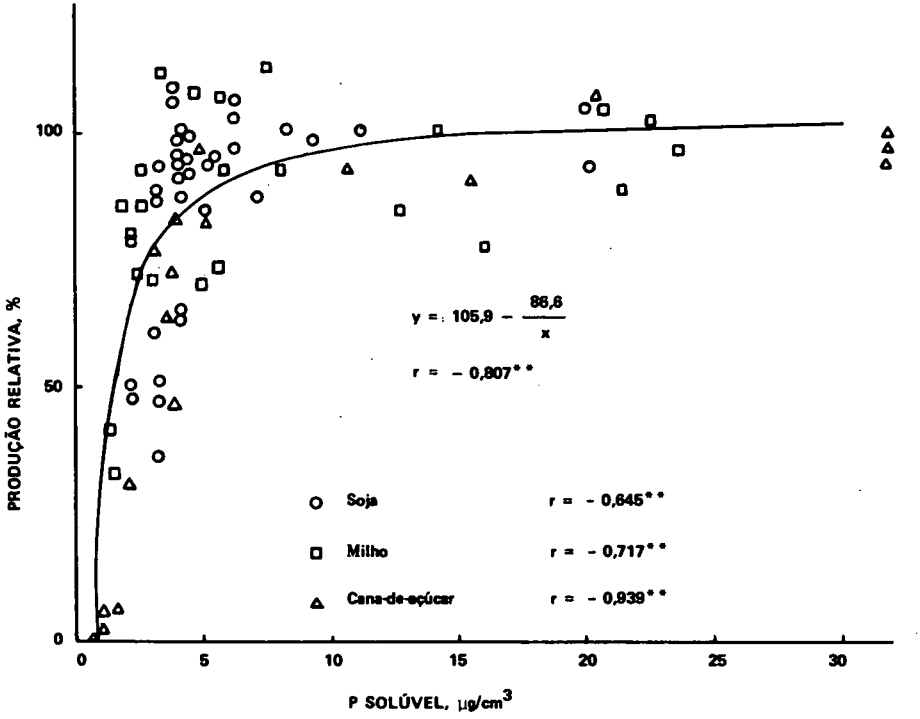

Figura 7.3. Correlação entre teores de fósforo solúvel e as respostas das culturas da soja, do milho e da cana-de-açúcar à adubação fosfatada. Resultados de São Paulo (soja e milho) e Alagoas (cana-de-açúcar).
Fontes dos dados utilizados nos cálculos: a) Raij, B. van & Mascarenhas, H.A.A. Anais XV Congr. Bras. Cl. Solos, p.309-311, 1976; b) Raij, B. van et al. Trabalho submetido para publicação em Bragantia; c) Marinho, M.L. & Albuquerque, G.A.C. 16th Congr. Intern. Sugar Cane Technologists, p.1283-1292, 1978.

Convém frisar que cada ponto da figura representa um ensaio diferente.

Os coeficientes de correlação apresentados na figura são bem mais baixos para milho e soja do que para cana-de-açúcar. A razão principal é a distribuição dos pontos pelas faixas de teores, que é bem melhor para a cana-de-açúcar. Em trabalhos desse tipo seria ideal incluir ensaios abrangendo desde ensaios com resposta muito alta a fós-

foro até ensaios sem resposta, como foi o caso para a cana. Na prática há limitações no que se refere a áreas disponíveis para ensaios e isto quase nunca é possível, devendo-se utilizar os resultados de ensaios que for possível realizar.

Na tabela 7.1. são apresentados os limites de classes de teores, para as três culturas da figura 3, e os limites de classes adotados no Instituto Agronômico. Os valores para as culturas, principalmente soja e cana-de-açúcar, são um pouco inferiores aos adotados na tabela de interpretação. Do ponto de vista prático isto é de pequena conseqüência, sendo preferível adotar limites únicos para diversas culturas, desde que as diferenças de limites de classes não sejam muito grandes. Considerando que as três culturas dos exemplos são bastante diferentes, e que os resultados para duas são de São Paulo e da outra de Alagoas, pode-se considerar que são bastante concordantes os limites de classes de teores indicados na tabela 7.1.

Tabela 7.1. Limites para classes de teores de fósforo no solo para algumas culturas. Os limites indicados correspondem, respectivamente, a produções relativas de 70, 90 e 100%, de acordo com o critério ilustrado na figura 5.3.

Cultura	Teores limites de fósforo no solo		
	Teor muito baixo, limite superior	Teor baixo, limite superior	Teor médio, limite superior
		$\mu g/cm^3$	
Soja, SP	2,8	4,9	7,7
Milho, SP	1,9	4,6	16,2
Cana-de-açúcar	4,3	8,2	16,0
Critério atual, SP	3,0	7,0	15,0

Fontes: Raij, B. van & Mascarenhas, H.A.A. Anais XV Congr. Bras. Ci. Solo, p. 309-315, 1976. Raij, B. van & et al. Submetido para publicação em Bragantia. Marinho, M.L. & Albuquerque, G.A.C. Congr. 16 th Intern. Soc. Sugar Cane Tachnologists. p. 1283-1292, 1978.

7.4.2. Adubação corretiva

A adubação corretiva visa elevar os teores de fósforo do solo a determinados valores. Trata-se mais da adubação do solo, visando corrigir a sua fertilidade, enquanto que a adubação de manutenção visa mais a planta, procurando obter a máxima eficiência do fertilizante aplicado.

Embora os enfoques das adubações de manutenção e correção, sejam diferentes, no caso da adubação fosfatada, cada uma atinge também parte dos objetivos da outra. Assim, na adubação corretiva consegue-se uma melhor nutrição das culturas, enquanto que nas adubações de manutenção ou da cultura, também eleva-se a fertilidade do solo, porque a maior parte do adubo fosfatado aplicado não é absorvido pelas plantas e permanece no solo.

A adubação corretiva é feita inicialmente em glebas de baixa fertilidade e repetida após cinco anos, se necessária. Anualmente são aplicadas para a cultura doses fixas de adubação de manutenção. A grande vantagem da adubação corretiva seria conseguir em pouco tempo uma elevada produtividade, o que não seria possível conseguir através das adubações de manutenção em solos de muito baixos teores de fósforo disponível. A desvantagem da adubação corretiva é a necessidade de maior investimento inicial na adubação.

A figura 7.4. mostra um exemplo em que, pela aplicação de adubações de manutenção de sulco, não se consegue de início produções muito elevadas. Contudo, após alguns anos, as produções totais de milho, para mesmas adições de fósforo, se aproximam.

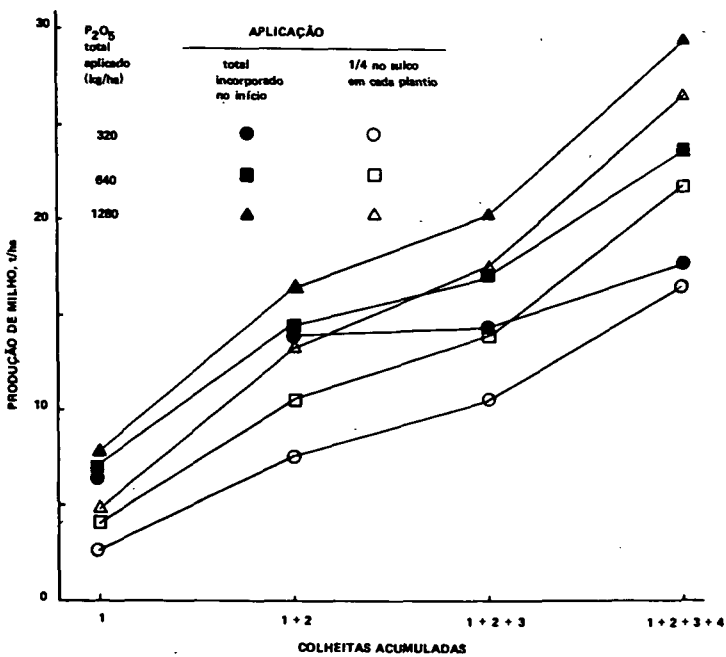

Figura 7.4. Produção de milho em um latossolo vermelho-escuro de cerrado, em Brasília, em função de níveis e métodos de aplicação de fósforo
Fonte: Yost, R. et al.. Anais XV Congr. Bras. Ci. Solo. p.303-307, 1976.

A calibração da análise de solo para adubação corretiva difere um pouco da calibração descrita para adubação de manutenção. São adicionadas doses crescentes de fósforo em parcelas de áreas experimentais e estabelecida uma cultura. Depois da colheita são retiradas amostras das parcelas e estabelecida a correlação entre teor do nutriente no solo e a produção relativa (denominada no Sul de rendimento relativo). É estabelecido o chamado nível crítico, de P no solo, correspondente a 90% do rendimento máximo. O intervalo de O de P no solo até o limite crítico é dividido em três classes de teores. Para cada classe de teores, é estabelecido o centro de classe e determinada a dose de fertilizante a aplicar para atingir esse valor. Como do fósforo aplicado ao solo, apenas uma pequena parte aparece na análise, é necessária uma informação sobre a conversão do nutriente aplicado no solo em aumento do teor na análise. Isto tem sido chamado de aparecimento na análise e pode ser calculado pela equação.

$$\%\ \text{Apar. P} = \frac{\text{P no tratamento x} - \text{P na testemunha}}{\text{P no tratamento x}} \qquad (7.2)$$

As tabelas de interpretação de análise para adubação corretiva consideram também a textura do solo, pois, há necessidades de maiores quantidades de fósforo nas adubações de correção em solos mais argilosos.

Normalmente os limites de classes de teores de fósforo no solo são mais elevados no sistema de adubação corretiva. Provavelmente isto se deve à adição de quantidades muito elevadas de fósforo ao solo de uma só vez. Em outras palavras, os níveis de fertilidade criados em solos a curto prazo devem ser mais elevados do que aqueles que se estabelecem em anos, através das adubações de manutenção.

Para cada classe de teor no solo, são estabelecidos níveis de adubação corretiva, considerando critérios econômicos.

7.5. Estabelecimento de níveis de adubação

No ítem 5.3.6. foram feitas considerações sobre o estabelecimento de níveis de adubação, que se aplicam ao caso do fósforo.

Uma vez estabelecidas as classes de teores em solos, os ensaios são agrupados e, para cada classe são estabelecidas curvas de resposta.

Na figura 7.5. são apresentadas as curvas de resposta para soja e milho, correspondentes aos ensaios utilizados nos exemplos anteriores. Nota-se que as respostas são muito maiores para as classes de teores mais baixos, demonstrando assim a eficiência da análise do solo.

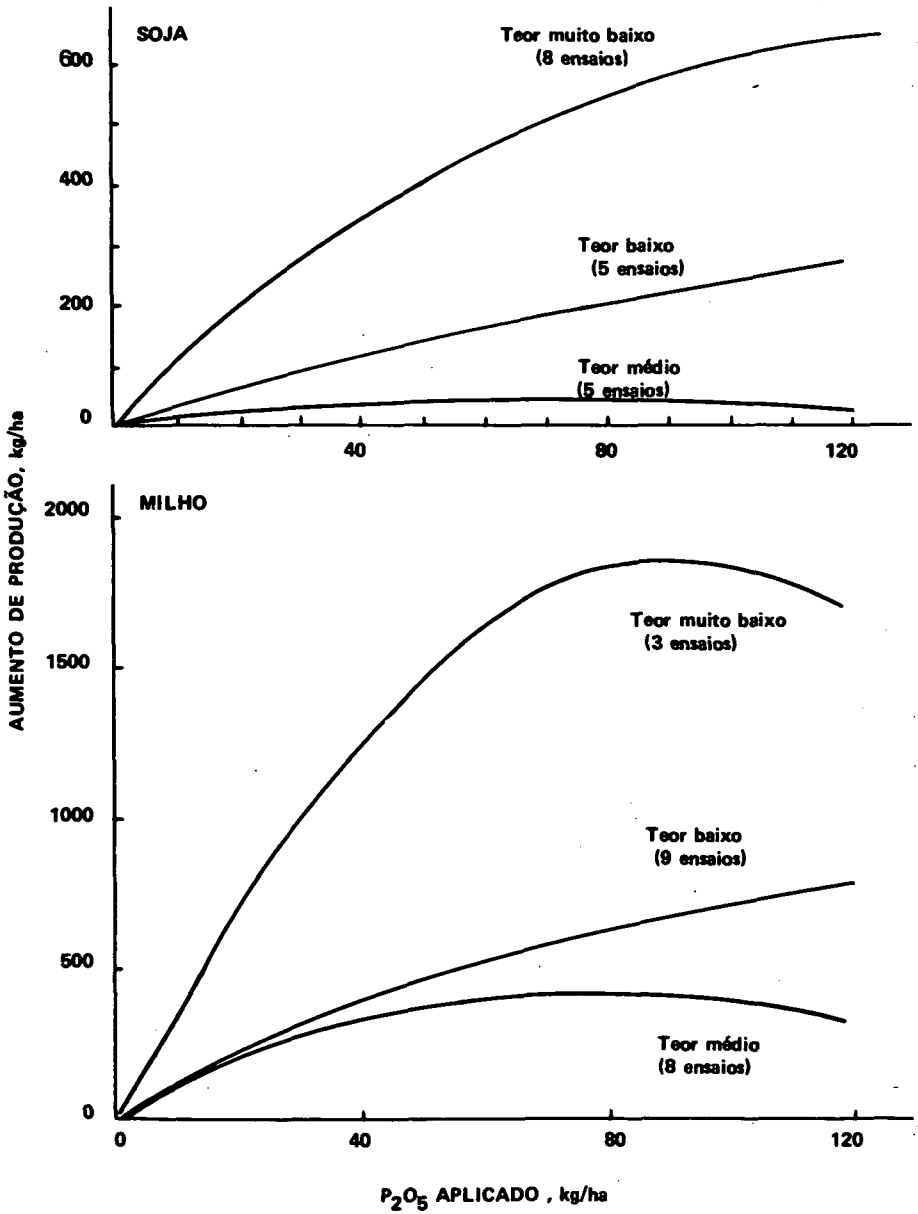

Figura 7.5. Curvas de resposta de soja e milho à adubação fosfatada para três classes de teores de fósforo no solo.
Fontes: Raij, B. van & Mascarenhas, H.A.A. Anais XV Congr. Bras. Ci. Solo, p.309-315, 1976; Raij, B. van et al. Submetido para publicação em Bragantia (1981).

Com base em curvas como essas, podem ser preparados gráficos como os da figura 4.7. ou calculadas doses econômicas por equações apropriadas. Com base nessas informações e mais aquelas discutidas em 5.3.6., são determinados os níveis de adubação fosfatada para as classes de teores de fósforo.

Além dos teores de fósforo, outros critérios podem ser utilizados nas tabelas de adubação. Provavelmente o melhor é o histórico. Em solos que vem sendo adubados e que produzem bem, mas mesmo assim continuam a apresentar teores baixos de fósforo no solo, a adubação fosfatada pode ser diminuída.

Outros critérios têm sido utilizados, tais como pH e matéria orgânica e é possível que a sua introdução melhore a eficiência da interpretação. Faltam, contudo, estudos comparativos para quantificar a eficiência de diferentes parâmetros, fornecidos pela análise de solo, na previsão do grau de deficiência de solos em fósforo.

Da mesma maneira, faltam estudos comparativos entre o sistema de adubação de manutenção e o sistema de adubação corretiva mais manutenção. No segundo caso, o gasto em fertilizante é, em geral, mais elevado, mas não há informações sobre avaliações econômicas comparativas que permitam fazer qualquer outra afirmação.

8. POTÁSSIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO

Estes três nutrientes são importantes como catíons trocáveis. Existe muita tendência a considerá-los em conjunto, por causa da influência que cada um exerce sobre a disponibilidade dos outros.

8.1. Formas no solo

Os três elementos encontram-se no solo nas formas iônicas de K^+, Ca^{2+} e Mg^{2+}, em solução e como catíons trocáveis. Além disso, principalmente potássio e magnésio participam da estrutura de micas e minerais de argila do tipo 2:1, que são encontrado em solos menos intemperizados, nos quais é possível a persistência desses e de outros minerais contendo esses elementos.

Em condições de boa drenagem os teores trocáveis de cálcio predominam na soma de bases, vindo a seguir, em teores bem mais baixos, o magnésio e depois o potássio, seqüência esta já explicada no ítem 3.2.

Cálcio e magnésio podem aparecer no solo como carbonatos insolúveis, em solos calcários, ou em solos que receberam calagem recente, nesses casos em partículas de granulometria grosseira que não dissolvem rapidamente.

Em solos contendo vermiculita, ilita, montmorilonita e micas intemperizadas, pode ocorrer fixação de potássio, que consiste no aprisionamento do elemento entre as camadas estruturais desses minerais. Como são minerais inexistentes ou escassos na maioria dos solos brasileiros, o fenômeno não deve ser muito importante, não despertando, em princípio e até que se prove o contrário, maiores preocupações.

Descrições minuciosas sobre este e outros aspectos relativos a potássio no solo, são dadas por Mielniczuk (1978) e Diest (1978).

Existe uma possibilidade de formas não trocáveis de potássio passarem a trocáveis, e vice-versa, em solos brasileiros, conforme é mostrado por Mielniczuk (1978). É um assunto mais importante em solos de clima temperado, onde o equilíbrio entre potássio trocável e não-trocável é bem definido.

8.2. **Disponibilidade**

As formas, absorvidas pelas plantas, de cálcio, magnésio e potássio, são as formas iônicas, Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+}, existentes na solução do solo. Na tabela 4.1. mostrou-se que a absorção dos dois primeiros dá-se por interceptação radicular e fluxo de massa, enquanto que a maior parte do potássio absorvido depende da difusão do elemento.

O potássio tem, assim, alguma semelhança com fósforo, que também depende da difusão para chegar às raízes. Contudo, sais de potássio apresentam em geral alta solubilidade e os teores de K^{+} na solução do solo podem também atingir concentrações bastante elevadas. Isto confere ao potássio uma mobilidade, relativamente a fósforo, maior, permitindo movimentação na forma de sais e lixiviação através do solo.

De uma forma simples, o seguinte esquema mostra o comportamento do potássio, até a absorção das raízes.

$$\text{K não trocável} \rightleftharpoons \text{K trocável} \rightleftharpoons \text{K em solução} \rightarrow \text{K na planta} \qquad (8.1)$$

É provável que o equilíbrio K não trocável e K trocável não seja muito importante, principalmente em solos mais intemperizados, embora esta afirmação seja em parte fundamentada em uma falta de trabalhos de pesquisa conclusivos sobre o assunto. Partindo, contudo, dessa premissa, seria o potássio trocável o fator quantidade do elemento no solo e praticamente a única reserva disponível. O potássio em solução, o fator intensidade, é controlado pelo teor trocável.

No ítem 3.4. mostrou-se uma equação (3.2.), usada para definir a relação entre catíons trocáveis e os teores na solução do solo. O potássio em solução depende dos teores de cálcio e magnésio. De uma maneira simples pode-se dizer que para um mesmo teor trocável, os teores em solução e portanto, a disponibilidade de potássio, serão menores se maiores forem os teores de cálcio e magnésio.

8.3. Métodos de determinação

Para os três nutrientes em geral são determinados os teores trocáveis. A extração pode ser feita com soluções salinas ou de ácidos fortes diluídos, obtendo-se resultados comparáveis.

Na maioria dos países, é o potássio trocável o critério mais usado para diagnosticar o estado de carência do nutriente (Grimme & Németh, 1978). No Brasil, com mais razão o critério deve ser adequado, considerando a contribuição de formas não trocáveis ao potássio disponível provavelmente pequena na maioria dos solos. A seguir será mostrado como o potássio trocável realmente é um critério bom para indicar a disponibilidade do nutriente.

8.4. Correlações e calibração para potássio trocável

As correlações entre resposta a culturas e teores no solo são bastante consistentes, para que se possa aceitar o teor trocável de potássio trocável no solo como um critério seguro para recomendar a adubação potássica. É o que mostra a figura 8.1. para diversas culturas.

É importante comparar a curva obtida nos Estados Unidos há 40 anos por Bray (1948), com as demais curvas e verificar como elas se assemelham. Note-se que na região daquele país onde foram conduzidos os ensaios com milho, os solos apresentam argila 2:1 e capacidade de troca de catíons muito maior do que nos solos brasileiros, esperando-se menor disponibilidade de potássio trocável, o que está refletido na figura.

Usando os critérios de calibração já descritos (ítem 5.3.5.), são obtidos os limites de teores indicados na tabela 8.2. São indicados também os limites de interpretação preconizados nas duas regiões brasileiras que têm publicados trabalhos sobre correlações entre respostas de culturas à adubação potássica e teores de K no solo.

No caso do Rio Grande do Sul, os limites referem-se à adubação de correção e não de manutenção. Tal como no caso do fósforo, a adubação de correção é indicada através da análise de solo, adotando-se doses fixas de adubação de manutenção. Pelo comportamento do potássio no solo, que praticamente permanece como trocável no solo, o aparecimento na análise não oferece os problemas registrados para fósforo.

Os demais exemplos referem-se a ensaios com adubação de manutenção, que é a mais praticada no País.

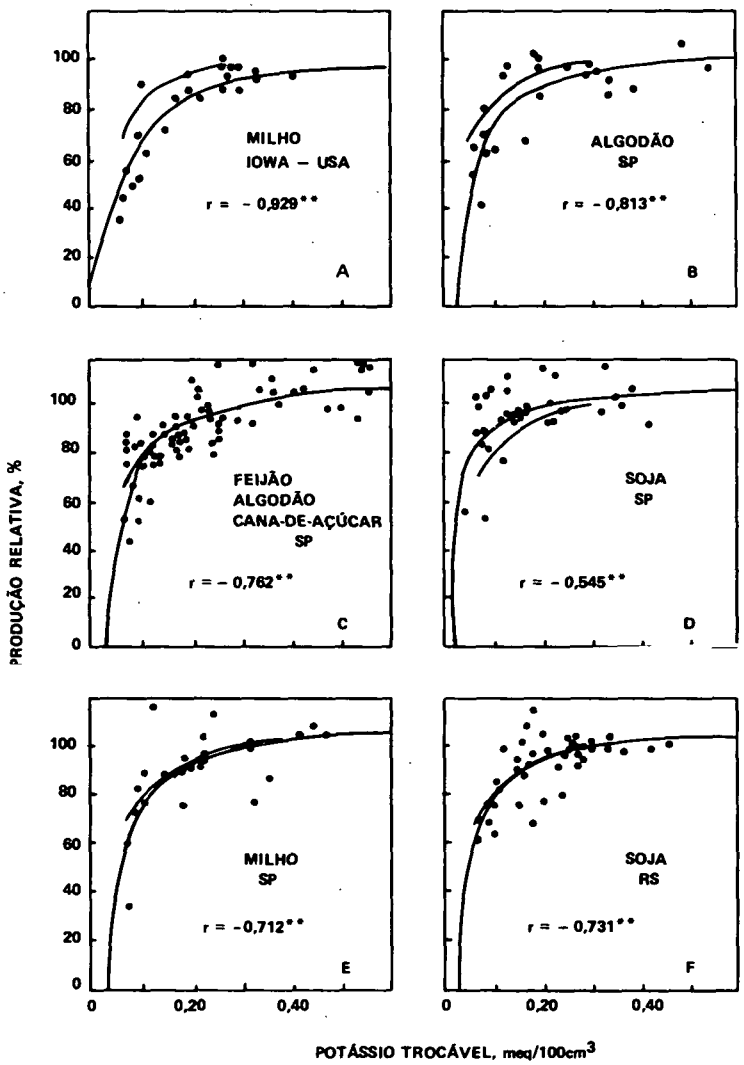

Figura 8.1. Curvas ajustadas para teores no solo de potássio trocável e respostas de culturas à adubação potássica. Os resultados tirados da literatura foram adaptados à figura. A curva menor, apresentada para facilitar a comparação dos diferentes casos, reflete o critério de interpretação em uso no Instituto Agronômico de Campinas.

Fontes: A - Bray (1948); B - Freitas, L.M.M. Fertilité 26: 37-47, 1966; C - Raij, B. van. Ciência e Cultura 26: 575-579, 1974; D - Raij, B. van & Mascarenhas, H.A.A. Anais XV Congr. Bras. Ci. Solo, p.309-315, 1976; E - Raij, B. van et al. Submetido para publicação em Bragantia; F - Mielniczuk, J. O potássio no solo. Bol. Tec. 2, Instituto da Potassa, 1978.

Tabela 8.1. Limites para classes de teores de potássio no solo para diversas culturas, considerando as curvas da figura 8.1. e as informações dos trabalhos citados. Os limites indicados correspondem, respectivamente, a produções relativas de 70, 90 e 100%, de acordo com o critério ilustrado na figura 5.3.

Cultura	Teores limites de potássio no solo					
	Teor muito baixo, limite superior		Teor baixo, limite superior		Teor médio limite superior	
	meq/100cm^3	µg/cm^3	meq/100cm^3	µg/cm^3	meq/100cm^3	µg/cm^3
Milho, Iowa	0,12	48	0,23	92	Indeterminado	
Algodão	0,10	40	0,20	80	0,47	188
Feijão	0,11	44	0,17	68	0,25	100
Algodão	0,08	32	0,15	60	0,24	96
Cana-de-açúcar	0,07	28	0,21	84	Indeterminado	
Soja – SP	0,04	16	0,09	36	0,21	84
Milho – SP	0,08	32	0,16	64	0,30	120
Soja – RS	0,08	32	0,16	64	0,32	128
Critério atual SP	0,07	28	0,15	60	0,30	120
Critério atual RS (1)	0,10	40	0,15	60	0,30	120

(1) Neste caso são dados os limites superiores das classes de teores baixos, médios e altos, com produções relativas correspondentes de 75, 90 e 100%.

8.5. Teores mínimos de magnésio e cálcio

No Brasil tem sido preconizada a elevação dos teores de cálcio e magnésio a 2 ou 3 meq/100cm³ de terra através da calagem, em casos em que os teores desses elementos são muito baixos, mesmo que os solos apresentam teores baixos de alumínio. A justificativa tem sido o fornecimento de cálcio e magnésio como nutrientes.

Qualquer que seja a justificativa para a aplicação de calcário, fornecimento de cálcio ou magnésio ou simples correção da acidez, ela é útil, tanto é assim que para muitas culturas, calagens bem mais elevadas seriam adequadas.

Por outro lado, as necessidades de cálcio para a maioria das culturas não são elevadas e os teores existentes no solo em geral seriam suficientes. É possível que o limite mínimo de cálcio no solo esteja bem abaixo de 2 ou mesmo 1 meq/100cm³ de terra. Deficiências em condição de campo são raríssimas e praticamente só ocorrem em condições de quase inexistência do nutriente. Em solos em que é praticada a calagem, não há razão para preocupação com o cálcio como nutriente, exceto para culturas que têm exigências especiais do elemento, como amendoim, tomate, citros, maçã e outras.

Já para magnésio a situação é diferente. O nutriente pode ou não ser fornecido pela calagem e deficiências tem sido constatadas em diversas culturas. O Instituto Agronômico mantém os limites de interpretação de teores de magnésio indicados por Catani e outros (1955), considerando ainda os argumentos de Doll & Lucas (1973). São eles:

Teor	Mg, meq/100cm³
Baixo	0,4
Médio	0,4 – 0,8
Alto	0,8

Para a maioria das culturas é possível que um teor de 0,4 meq/100cm³ seja suficiente.

8.6. Saturação de catíons

Já foi considerada anteriormente a saturação em bases da capacidade de troca e sua relação com o pH, bem como a saturação de alumínio em relação à soma de catíons trocáveis, também relacionada com o pH.

Seria possível considerar que a saturação de outros catíons estivesse correlacionada com os teores em solução e, se fosse o caso, a

representação dessa maneira seria talvez adequada para representar a disponibilidade do nutriente.

Na figura 8.2. é apresentada a correlação entre a saturação em potássio da capacidade de troca e a produção relativa de algodão, para os mesmos ensaios considerados na figura 8.1.B. No caso seria indiferente usar a saturação em potássio ou os teores de potássio trocável.

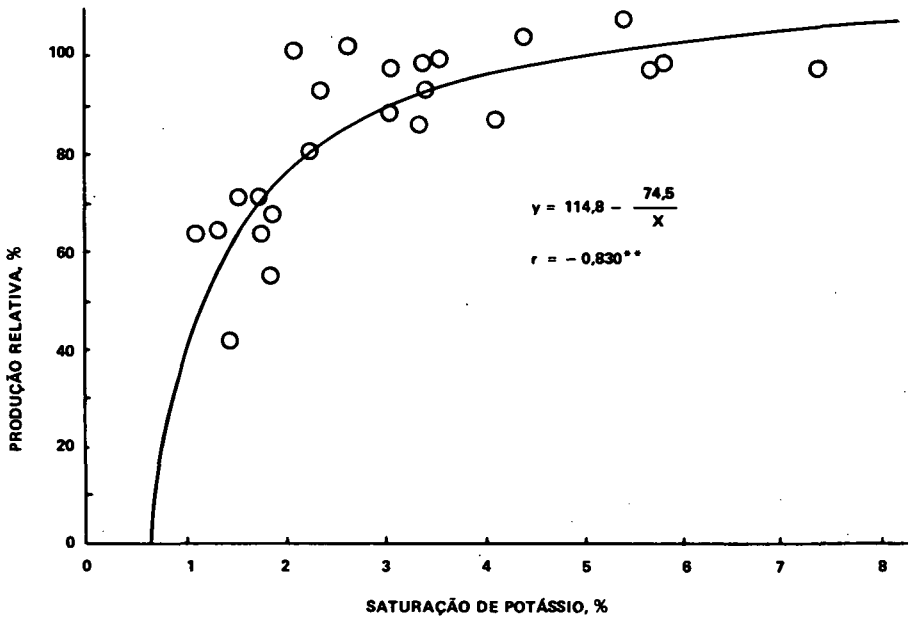

Figura 8.2. Correlação entre respostas do algodoeiro à adubação potássica e a saturação em potássio dos solos.
Fonte : A correlação foi recalculada, usando resultados médios por local. Do trabalho de Freitas, L.M.M. et al. **Fertilité 26: 37-47, 1966.**

Têm sido preconizadas relações ideais entre os catíons Ca, Mg e K, cuja origem primária pode ser detectada em trabalhos de pesquisa realizados nos Estados Unidos. Mesmo naquele país, não parece ser a melhor solução (McLean, 1977).

Na realidade as plantas tem uma capacidade de adaptação bastante grande, e só em relações extremas elas seriam muito afetadas em seu crescimento. Aparentemente, os teores absolutos dos nutrientes seriam o fator principal a determinar a disponibilidade, podendo a relação com os demais catíons afetar essa disponibilidade.

Assim, teores muito altos de cálcio e magnésio diminuem a disponibilidade de potássio e teores muito altos de potássio podem agravar deficiências de magnésio.

Na prática é muito difícil ajustar relações de catíons, principalmente porque a capacidade de troca de catíons dos solos brasileiros é em geral baixa.

Algumas regras práticas podem servir de orientação. Não se deve deixar o teor de potássio ultrapassar o de magnésio (ambos em meq). Manter altos teores de cálcio ajuda a evitar perdas de potássio por lixiviação e reduz o consumo de luxúria de potássio.

8.7. Respostas de culturas a potássio

São dados exemplos com o objetivo de demonstrar a utilização da análise de terra na discriminação das respostas das culturas à adubação potássica. Os resultados da figura 8.3. mostram que o critério do potássio trocável é eficiente e que, onde os teores do nutriente no solo são baixos, a resposta à adubação potássica é apreciável.

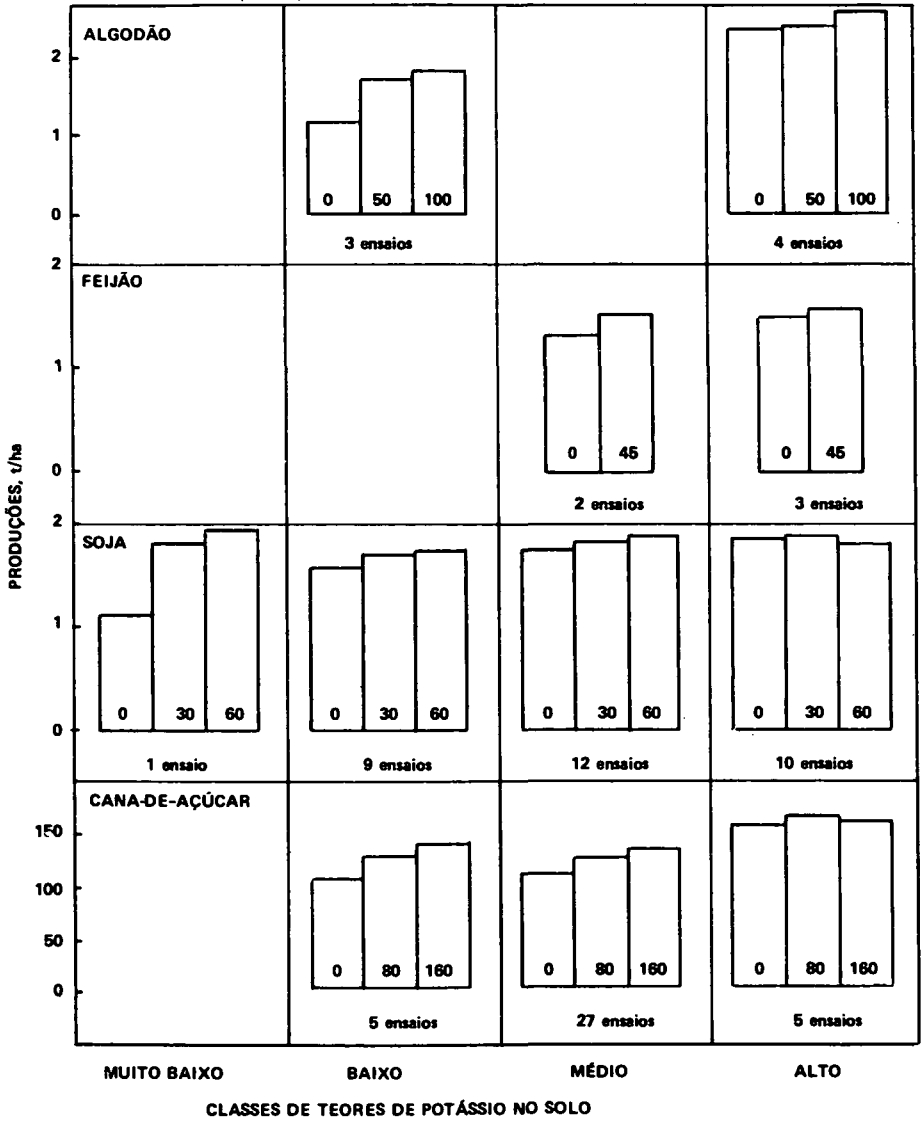

Figura 8.3. Respostas de quatro culturas à adubação potássica, para quatro classes de teores de potássio no solo. Os números dentro dos gráficos indicam quantidades de K_2O em kg/ha. Espaços vazios indicam a não existência de ensaios na literatura citada.
Fontes: Raij, B. van. Ciência e Cultura 26: 575-579, 1974; Raij, B. van & Mascarenhas, H.A.A. Anais XV Congr. Bras. Ci. Solo, p.309-315, 1976.

9. NITROGÊNIO

É um elemento notável em vários aspectos e de comportamento completamente diferente daquele dos nutrientes discutidos até aqui, fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

É o mais caro dos nutrientes e o requerido em maiores quantidades pela maioria das culturas.

Embora exista em teores totais elevados em solos, equivalentes a algumas toneladas de N por hectare, a um dado momento são baixas as quantidades disponíveis, que não estão em equilíbrio com o nitrogênio não disponível, diferindo neste aspecto dos nutrientes fósforo e potássio. Além disso, por ser móvel no solo, não se acumulam os efeitos diretos das adubações, embora possa haver efeito de um ano para outro, de adubações nitrogenadas, através da ciclagem do elemento pelas plantas.

Em poucas regiões do mundo tem sido possível estabelecer critérios de análise do solo eficientes para nitrogênio. As razões disto serão discutidas.

9.1. Formas no solo

Foi discutido nos ítens 2.7. e 3.6. que o nitrogênio encontra-se no solo predominantemente em forma orgânica. O restante, uma pequena fração muito variável do teor total, encontra-se nas formas inorgânicas de amônio, NH_4^+ e, principalmente, de nitrato, NO_3^-. Em condições de boa aeração e pH não muito baixo, o amônio é rapidamente convertido em nitrato.

O nitrogênio inorgânico do solo existente em cada instante, é resultante dos processos de mineralização da matéria orgânica atuando

em sentido favorável, e da imobilização atuando em sentido desfavorável. Esses processos atuam simultaneamente.

Deve-se lembrar que são adicionados ao solo, naturalmente, formas inorgânicas de nitrogênio da atmosfera, em quantidades que podem chegar a 20 kg/ha de N em casos extremos, e nitrogênio proveniente de fixação biológica assimbiótica e simbiótica que, no último caso, podem chegar a mais 100 kg/ha de N (Russell, 1973).

As quantidades de nitrogênio em formas inorgânicas no solo são muito variáveis e afetadas por condições climáticas, temperatura em climas temperados e umidade em climas tropicais. Os valores podem variar de alguns a centenas de quilogramas de nitrogênio por hectare, com variações muito grandes em pequenos períodos (Harmsen & Kolenbrander, 1965; Verdade, 1951).

9.2. **Disponibilidade**

As formas disponíveis principais são os íons amônio e nitrato, portanto as formas inorgânicas. A um dado momento, o que existir no solo poderá em grande parte ser absorvido.

Durante o ciclo de uma cultura, é também importante o nitrogênio que é mineralizado da matéria orgânica, bem como o que é imobilizado, a diferença representando o nitrogênio disponível, parte do qual pode ser absorvido.

As quantidades à disposição, durante o ciclo de uma cultura, são afetadas pelos resíduos de matéria orgânica de culturas anteriores, a relação C/N dos resíduos e da matéria orgânica do solo, e de fatores que afetam a mineralização, principalmente aeração, umidade, temperatura e reação do solo.

A longo prazo, o suprimento de um solo é cada vez menor, com o passar dos anos. Isto significa que, em solos que vem recebendo adubações constantes, as respostas a nitrogênio aumentam gradativamente.

A razão desse comportamento deve-se à diminuição gradativa dos teores de matéria orgânica que ocorre em solos cultivados. O fenômeno é mais aparente em solos de alta fertilidade, inicialmente sob floresta. Nessas condições ocorre, durante séculos, acúmulo de matéria orgânica, chegando a um teor que reflete em cada caso, um equilíbrio entre ganhos e perdas. Em solo cultivado o teor de matéria orgânica em equilíbrio com o novo sistema de uso, é muito mais baixo. Ocorre, ao introduzir-se um solo na agricultura, uma queda exponencial do teor de matéria orgânica, mais rápida no início e em proporção cada vez menor, buscando um novo equilíbrio, que pode ser atingido em décadas, ou talvez séculos. O suprimento de nitrogênio é decorrente deste fenô-

meno, sendo em geral suficiente para as culturas em solos recém desbravados, tornando-se cada vez mais carente, a medida que a decomposição da matéria orgânica diminui e, portanto, torna-se menor a liberação de nitrogênio.

Em cada ano, o suprimento de nitrogênio à partir da matéria orgânica é de difícil previsão, já que o fenômeno geral descrito no parágrafo anterior é uma tendência que se verifica a longo prazo, havendo considerável variação de ano para ano.

Para cada cultura, a disponibilidade de nitrogênio do solo irá depender também do comprimento de seu ciclo, as que vegetam por mais tempo aproveitando melhor o nitrogênio inorgânico liberado durante o ano, principalmente se o sistema radicular for bem desenvolvido.

Além disso, a produtividade é um fator a ser levado em conta. Para culturas de baixa produtividade, o teor disponível do solo pode ser adequado, enquanto que, para altas produtividades, a deficiência de nitrogênio pode ser o fator determinante do limite de produção, devido à baixa elasticidade da disponibilidade do nutriente. Deve-se lembrar que, neste aspecto, a deficiência de nitrogênio pode ter efeitos repentinos na limitação do crescimento, como no caso de deficiências de água (ver ítem 4.6.).

9.3. **Métodos de determinação**

Existem muitos métodos de determinação de nitrogênio no solo, alguns testados com sucesso em condições homogêneas e no mesmo solo, falhando contudo, para vários solos considerados em conjunto. Uma descrição dos principais métodos de determinação de nitrogênio é dada por Dahnke e Vasey (1973).

Aqui serão discutidas apenas dois casos. Um por que vem sendo usado no Brasil e o outro porque poderá vir a ter sucesso, desde que venha a ser pesquisado.

Um dos métodos que tem sido usado para nitrogênio é o baseado em uma mineralização média da matéria orgânica, freqüentemente admitida como sendo de 2% ao ano. No passado era determinado o nitrogênio total nos solos. Hoje determina-se matéria orgânica e, para fins práticos pode-se considerar, que o teor de nitrogênio é igual ao teor de matéria orgânica dividido por 20. Como exemplo, um solo com três por cento de matéria orgânica, teria 0,15% de N ou 3 t de N na camada arável. Considera-se aqui que a matéria orgânica é expressa em porcentagem sobre o volume do solo. Uma mineralização de 2% forneceria 60 kg/ha por ano de nitrogênio.

O raciocínio é muito simplista e na prática não tem sido demonstrado que ele se aplica. Note-se que além da precariedade da premissa de que haverá uma liberação determinada de nitrogênio, deve-se considerar ainda que, para muitas culturas, o nutriente deve estar disponível em um período relativamente curto do desenvolvimento.

Na figura 9.1 são dados dois exemplos de relações entre aumentos de produção devido à adubação nitrogenada e o teor de matéria orgânica nos solos, considerando-o como uma estimativa do teor total de nitrogênio. Devido ao caráter móvel do elemento no solo, preferiu-se representar os efeitos do nitrogênio em aumentos absolutos de produção. Nota-se que não houve uma relação definida entre as variáveis para os dois casos.

É, contudo, possível, que em condições mais homogêneas de manejo de solos, sejam obtidas correlações entre resposta à adubação nitrogenada e o teor de matéria orgânica no solo.

Uma outra possibilidade de análise de solo de nitrogênio em solos, consiste em analisar o teor de nitrato no solo, até profundidades de 60cm o que permite, juntamente com outras informações, inclusive de mineralização média esperada, prever as necessidades de adubação nitrogenada. É um método bom para regiões semi-áridas, onde não ocorre lixiviação de nitrato (Smith, 1977).

Esta parece ser uma alternativa possível para o Brasil, principalmente na região tropical de inverno seco. Faltam, porém, conhecimentos básicos sobre teores de nitrato de solo e mineralização da matéria orgânica.

9.4. **Níveis de adubação nitrogenada**

Não havendo critério eficiente para discriminar respostas de culturas à adubação nitrogenada, pelo menos para os exemplos considerados, optou-se pela apresentação de curvas de resposta médias para nitrogênio, a título de exemplo. São apresentadas na figura 9.2. para algumas culturas.

Com curvas de resposta como as da figura 9.2. é possível determinar doses a aplicar, utilizando os critérios discutidos em 4.8. e 5.3.6. ou outros.

Como critérios auxiliares são muito úteis: o aspecto da vegetação, com cores verdes intensas indicando suprimento adequado de nitrogênio; o histórico, recomendando-se menos nitrogênio no caso de solos de cultivo recente ou que estiveram em pousio ou, ainda, que foram cultivados com leguminosas; a fertilidade geral da gleba, recomendando-se mais nitrogênio em solos há muito cultivados e com pH e teores de P e K elevados; a produtividade, aplicando-se mais nitrogênio nos casos de maiores produtividades.

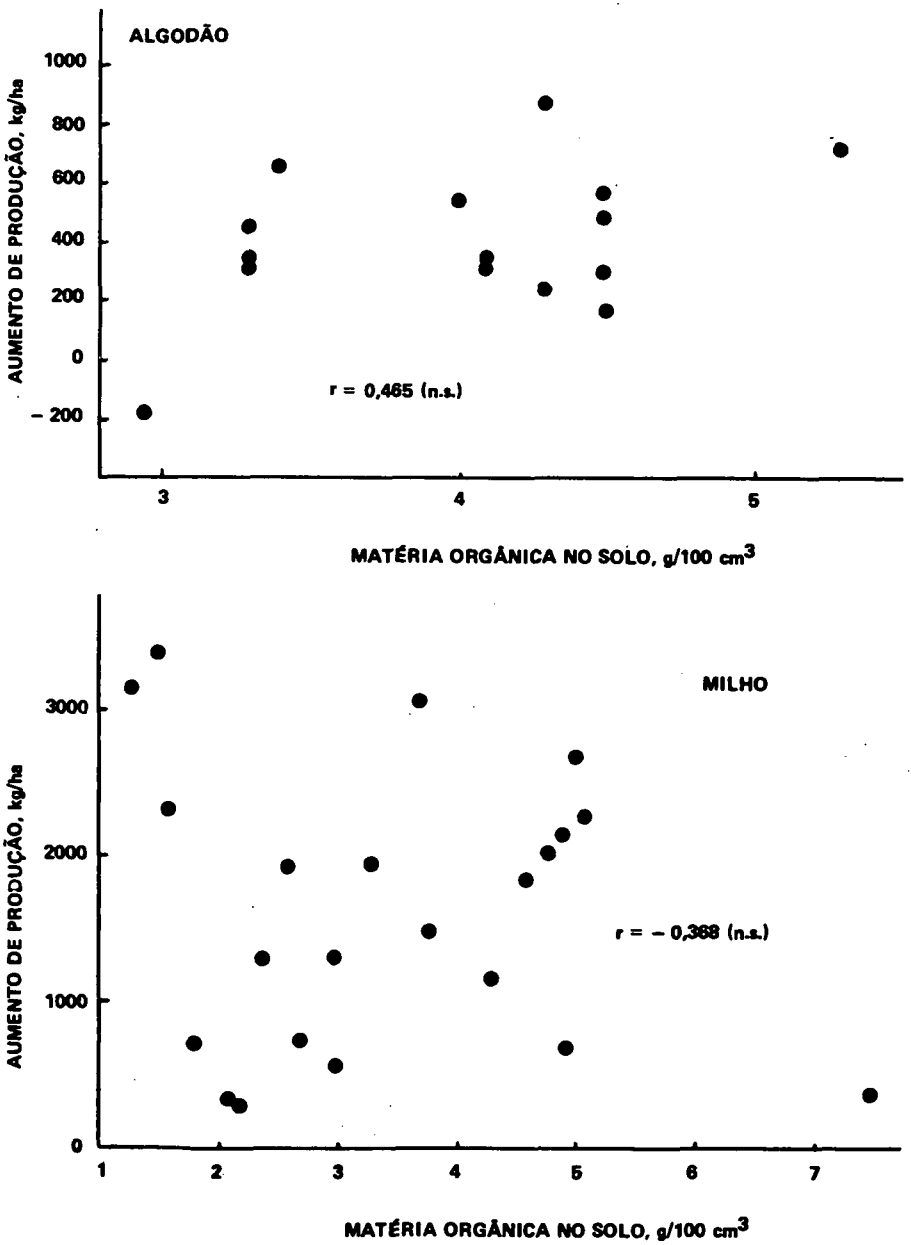

Figura 9.1. Relações entre respostas das culturas de algodão e milho à adubação nitrogenada e teores de matéria orgânica dos solos.
Fontes: Silva, N.M. Instituto Agronômico, Campinas. Bol. n.º 8 do projeto BNDE/ANDA/CIA, 1971. Raij, B. van et al. Submetido para publicação em Bragantia (1981).

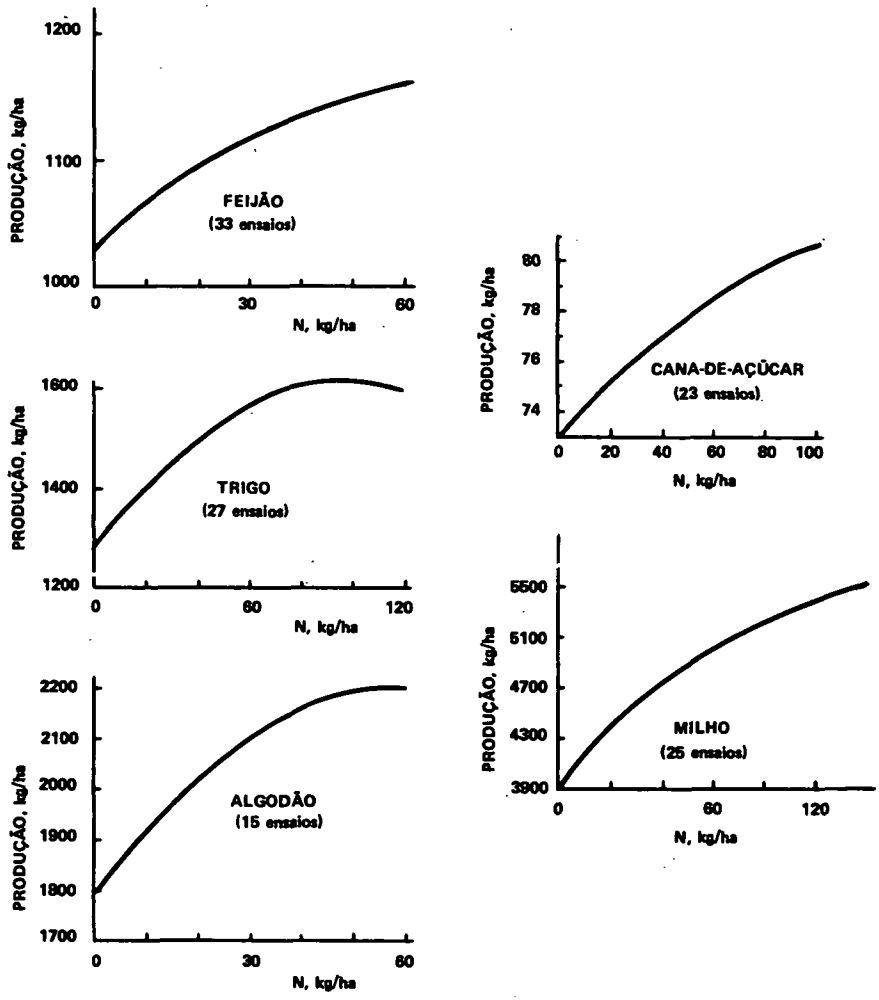

Figura 9.2. Exemplos de curvas de resposta a nitrogênio, médias para diversas culturas. Fontes: Feijão (SP) - Miyasaka, S. et al. Bragantia 24 (1965): 231, 25(1966): 145, 371, 393, 26 (1967): 161. Trigo (SP) - Camargo, C.E.O. et al. Bragantia 31 (1972): 315, 325, 337, 349, 34(1975): 273, 35 (1976): 87, 95. Algodão (SP) - Silva, N.M. Instituto Agronômico, Projeto BNDE/ANDA/CIA, Boletim N.º 8, 1971. Cana-de-açúcar (AL) - Marinho, M.L. et al. Anais XV Congresso Bras. Ci. Solo (1966), p.193. Milho (SP) - Raij, B. van et al. Submetido para publicação em Bragantia.

10. ASPECTOS PRÁTICOS RELACIONADOS AO EMPREGO DA ANÁLISE DE SOLO

Os capítulos precedentes trataram de diversos aspectos de fertilidade do solo, com o objetivo de ressaltar os mecanismos que governam a disponibilidade de nutrientes, e os princípios básicos dos métodos de avaliação. Admitiu-se que avaliação da fertilidade do solo só se completa com a determinação das quantidades de corretivos e fertilizantes a aplicar, e foram dados exemplos para ilustrar as idéias expostas no texto.

Neste capítulo apresenta-se um resumo dos aspectos práticos relacionados com o emprego da análise de solo, considerando que é ela a técnica mais eficaz disponível para avaliar e controlar a fertilidade do solo.

10.1. Informações necessárias para o uso eficiente de corretivos e fertilizantes

Para determinar quantidades de corretivos e fertilizantes a aplicar, é necessário recorrer a tabelas de adubação de culturas, que são preparadas pelos órgãos de pesquisa que atuam regionalmente. Essas tabelas são preparadas em grande parte de acordo com o que foi descrito nesta publicação, com algumas variações e enfoques regionais.

É útil obter a versão mais recente das tabelas de adubação junto aos órgãos de extensão, assistência técnica ou pesquisa. Elas devem ser manuseadas de preferência por engenheiros agrônomos, por não serem apresentadas em geral em lingüagem acessível ao leigo.

Na maioria dos casos as recomendações são para as formas mais eficientes dos fertilizantes e para rochas calcárias moídas. Outros insumos podem ser utilizados, como é o caso de fosfatos naturais e, nesses casos, devem ser buscadas informações específicas sobre o seu emprego.

As tabelas de adubação trazem também informações sobre adubações orgânicas, para culturas onde ela se faz necessária, bem como sobre aplicações de micronutrientes.

É preciso ressaltar que não se pode esperar uma concordância grande entre tabelas de adubação entre diversas regiões, devido as diferentes informações utilizadas em sua construção, algumas de caráter regional. Contudo, foi visto que a dose mais econômica a aplicar admite considerável variação para mais ou menos, sem afetar consideravelmente o retorno devido à adubação (vide figura 4.6.). Esta flexibilidade é muito útil na adaptação dos programas de adubação a cada caso.

É muito importante que os engenheiros agrônomos, ao depararem-se com dúvidas sobre a adubação ou a calagem ou sobre o uso de tabelas, consultem os órgãos de extensão, assistência técnica ou pesquisa. Tais órgãos existem para atendimento à comunidade e necessitam ser constantemente acionados, inclusive muitas vezes para tomarem conhecimentos de determinados problemas.

10.2. **Planejamento da análise de solo**

A análise de solo não deve ser encarada apenas como uma técnica para estabelecer as necessidades de uma cultura em um determinado ano. Ela deve ser considerada para ajustar os programas de calagem e adubação a longo prazo.

Na maioria dos casos o intervalo entre análises pode ser de 2 a 4 anos, o período menor quando mais de uma cultura é feita por ano no mesmo local.

O primeiro passo no planejamento da análise de solo é delimitar as glebas, que de preferência não devem ultrapassar 10 hectares, e identificá-las. Em seguida preparar um cronograma de análises para diversos anos, considerando a amostragem de uma parte da propriedade em cada ano, dentro de um esquema de rodízio.

Devem ser guardadas em uma pasta informações sobre o plano, o mapa ou croquis indicando a identificação das glebas, cópias das folhas de informações enviadas ao laboratório, resultados de análise, informações sobre calagens e adubações praticadas e resultados obtidos em produtividade. Essas informações permitem acompanhar a evolução da fertilidade e da produtividade das diferentes glebas.

10.3. Laboratórios de análise

Existem várias dezenas de laboratórios de análise de solo no País. Aqueles que eram do conhecimento do autor em 1980, são listados na tabela 10.1.

Tabela 10.1. Municípios brasileiros em que existem laboratórios de análise de solo

Estado	Municípios
Rio Grande do Sul	Porto Alegre (2), Santa Rosa, Pelotas, Santa Maria, Santo Ângelo, Passo Fundo, Cachoerinha
Santa Catarina	Florianópolis
Paraná	Curitiba (2), Londrina (2), Rio Negro, Ponta Grossa, Guarapuava, União de Vitória, Pato Branco, Cascavel, Umuarama, Campo Mourão, Paranavaí, Maringá, Cornélio Procópio, Jacarezinho.
São Paulo	Campinas (2), Piracicaba (2), São Paulo (3), Santo André, Jaboticabal, São José do Rio Preto, Botucatu, Ribeirão Preto, Catanduva.
Minas Gerais	Viçosa, Sete Lagoas, Lavras, Caratinga, Belo Horizonte
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro, Niterói, Campos, Itaguaí
Espírito Santo	Vitória
Distrito Federal	Brasília
Mato Grosso	Cuiabá
Goiás	Goiânia (2)
Bahia	Itabuna, Cruz das Almas
Alagoas	Maceió
Pernambuco	Recife
Ceará	Fortaleza (2)
Maranhão	São Luiz
Piauí	Terezina
Pará	Belem

As análises de solo são hoje feitas por diversas organizações, órgãos de pesquisa dos governos federal ou estaduais, faculdades de agronomia, companhias de fertilizantes, cooperativas e profissionais autônomos.

Existe bastante uniformidade na metodologia de análise, as diferenças regionais resumindo-se ao critério de necessidade de cala-

gem e a utilização ou não de critérios de análise de solo para nitrogênio.

10.4. **Impressos necessários**

Os impressos existentes para análise de solo são a caixinha para remessa de terra, a folha de informações e o folheto que orienta sobre amostragem e outros detalhes.

A caixinha é de papelão, desmontada, apresentando informações sobre amostragem e local para identificação adequada da amostra. Alguns laboratórios utilizam saquinhos plásticos especialmente fabricados para análise de terra.

Os folhetos que orientam sobre amostragem podem ser conseguidos em alguns laboratórios, firmas de fertilizantes ou escritórios de assistência técnica. Esses folhetos indicam, de forma ilustrada por figuras ou fotografias, como retirar amostras e outros detalhes importantes referentes à análise de solo. Frequentemente as mesmas informações são dadas no verso da folha de informações.

A folha de informações deve ser preenchida com os dados solicitados, necessários ao laboratório, tais como remetente, endereço, número das glebas, histórico de adubações e calagem, uso anterior do solo, produtividade, culturas a serem feitas, etc.

O impresso necessário para análise de solo pode ser conseguido em escritórios locais de extensão rural ou assistência técnica, com representantes de firmas de fertilizantes ou diretamente dos laboratórios de análise.

10.5. **Amostragem**

A área a ser mostrada deve ser dividida em glebas de no máximo 10 hectares. Cada gleba deve ser homogênea em aspecto da vegetação, solo, produtividade e tratamentos passados com calcário e fertilizantes. Áreas que diferem em aparência, declividade, drenagem, tipo de solo e tratamentos anteriores, devem ser amostradas separadamente. Áreas ou manchas de aspecto excepcional não devem ser amostradas ou, se desejado, devem ser amostradas separadamente. A figura 10.1. dá uma idéia sobre a demarcação de glebas a amostrar e o caminhamento percorrido durante a amostragem.

De cada gleba devem ser retiradas 20 amostras simples, de mesmo volume. Estas amostras são obtidas através de um caminhamento em ziguezague, conforme indicado na figura 10.1. A profundidade de amostragem é de 20cm para áreas de culturas anuais ou culturas

perenes a serem instaladas em terreno arado. No caso de culturas perenes instaladas, a amostragem é feita até 10cm e no local onde são feitas as aplicações de adubos. Em qualquer caso deve-se evitar amostrar qualquer ponto estranho do terreno, depressões enxarcadas, manchas com calcário ou adubo, etc.

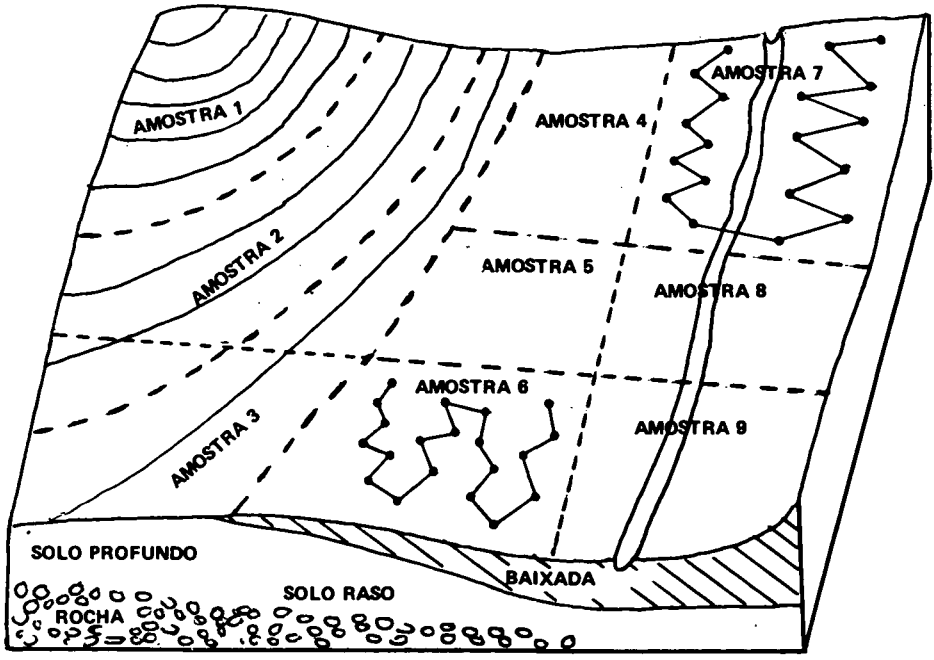

Figura 10.1. Divida a propriedade em glebas de até 10 hectares, numerando cada uma delas. As glebas devem ser homogêneas em uso anterior, tipo de solo e aspecto geral da vegetação. Percorra cada gleba em zigue-zague, tirando 20 amostras simples, que devem ser misturadas, separando-se uma amostra composta de meio quilograma para ser enviada ao laboratório.

As vezes é interessante retirar amostras muito cedo, antes mesmo da aração dos restos da cultura anterior. Nesses casos evitar a retirada de amostra dentro dos sulcos de plantio. Fazendo assim é provável subestimar ligeiramente a fertilidade da área, o que não traz grandes conseqüências. O pior é retirar amostras dos sulcos e obter uma informação sobre a fertilidade exageradamente alta.

Após a retirada da amostra composta de 20 pontos, a terra é muito bem misturada, separando-se cerca de 500g. Se a terra estiver molhada, convém secá-la ao ar antes de colocá-la na embalagem para remessa ao laboratório.

A amostragem pode ser feita com diversas ferramentas: enxadão, pá, tubo para amostragem, trados, pá de jardineiro, etc. Em qualquer caso é sempre necessário que as subamostras sejam retiradas de maneira uniforme em volume e profundidade. As ferramentas mais práticas na maioria dos casos são os trados. Infelizmente ainda não existem fabricantes de trados que os produzam em série. Na figura 10.2. são ilustradas algumas das ferramentas mais comumente utilizadas para amostragem de solos.

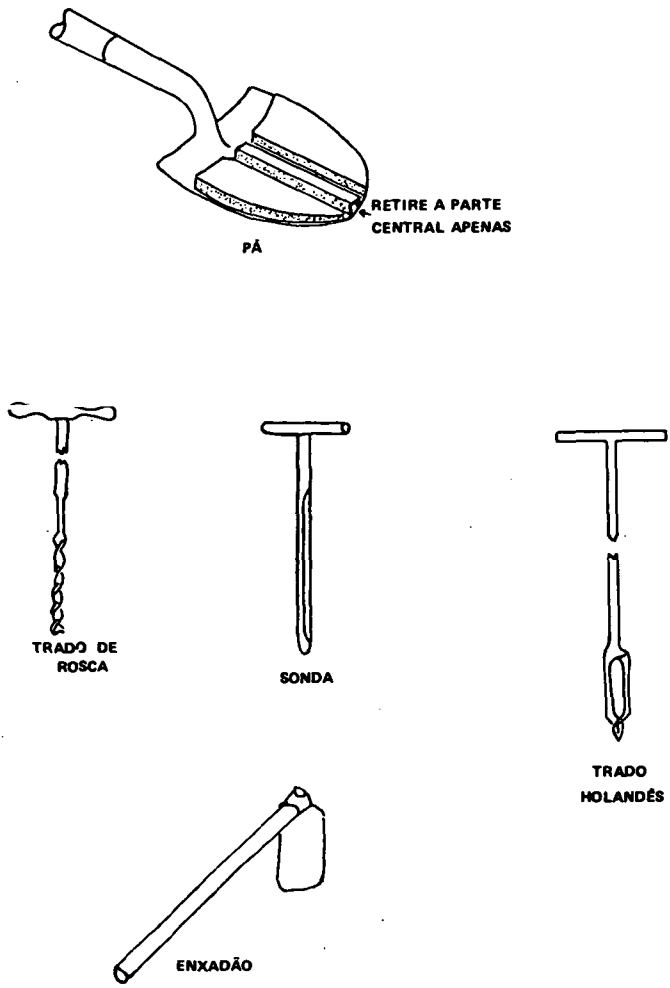

Figura 10.2. Diversas ferramentas podem ser utilizadas para retirar amostras de solo. A mais prática é, em geral, o trado da direita, infelizmente ainda não fabricado em série no Brasil.

Na prática têm sido feitas simplificações na amostragem, a mais comum consistindo na redução de pontos amostrados por amostra composta. Trata-se de atitude tecnicamente errada, de acordo com os argumentos dados em 5.3.2, podendo levar a conclusões distorcidas sobre a fertilidade da gleba amostrada.

É conveniente conhecer-se o solo em profundidade, a fim de poder conhecer limitações que podem afetar a produtividade, tais como textura excessivamente arenosa ou acidez elevada. Isto necessita ser feito uma só vez, pois, as adubações e calagens superficiais dificilmente afetam o solo abaixo da camada arável. Para isso é conveniente retirar amostras entre 60 e 80cm, fazendo-se amostras compostas de pelo menos 10 pontos de cada área amostrada. Trata-se de amostragem bastante trabalhosa e que pode ser feita com trado. É preciso muito cuidado para evitar contaminação com solo da superfície.

10.6. **Envio ao laboratório**

As amostras devem ser devidamente embaladas e identificadas. A folha de informações deve também ser preenchida corretamente.

As amostras podem ser enviadas por companhias de transporte ou pelo correio ou entregues diretamente no laboratório. A folha de informações segue em envelope juntamente com cheque nominal referente ao custo das análises, normalmente separadamente da terra. O pagamento antecipado é necessário para alguns laboratórios, que só iniciam as análises após o seu recebimento.

Em algumas regiões as amostras podem ser entregues aos escritórios de extensão rural, assistência técnica ou firmas de fertilizantes, que encarregam-se de fazer chegar as amostras ao laboratório.

10.7. **Os resultados de análise**

10.7.1. Análises mais comuns

Todos os laboratórios de análise de solo do País apresentam, entre outros, os seguintes resultados:

a) pH;
b) potássio (K);
c) fósforo (P);
d) cálcio (Ca) e magnésio (Mg) ou cálcio + magnésio (Ca + Mg).

Outras determinações frequentemente fornecidas são:

e) alumínio (Al);

f) matéria orgânica (M.O. ou C);
g) textura;
h) pHSMP;
i) hidrogênio + alumínio (H + Al).

Além dessas determinações, podem ser apresentados valores calculados à partir delas, como é o caso da soma de bases (S), da capacidade de troca de catíons (T), da saturação em bases (V) e da saturação em alumínio (m).

10.7.2. Unidades de representação

Não existe uniformidade na maneira de apresentar resultados de análise de solo, entre os diferentes laboratórios. Este fato tem levado frequentemente a confusões, principalmente nas comparações de resultados de diferentes origens.

Além disso, os laboratórios de solo que analisam amostras para agricultores, medem volumes de terra para as análises e expressam os resultados por volume, enquanto que laboratórios que analisam amostras para levantamentos de solos, expressam os resultados por peso de solo. Para converter os resultados expressos por peso para expressão em volume, basta multiplicar o resultado pela massa específica global (densidade aparente) do solo. Assim, um teor de cálcio de 2,5 meq/100g de terra, em um solo de massa específica global de 1,2 g/cm^3, equivale a 3,0 meq/100cm^3 de terra.

Para fins de recomendação de calagem e adubação, deve-se utilizar os resultados expressos sempre na base de volume de terra.

Quanto às unidades cabe discutir as mais freqüentemente usadas. Exclue-se da discussão o pH que, sendo adimensional, não requer unidade.

Para Ca, Mg, Al, H + Al, S, T e, freqüentemente K utiliza-se a representação de meq/100 ml de terra (ou 100ml de TFSA, terra fina seca ao ar), ou meq/100cm^3 de terra, o que dá no mesmo.

Os catíons trocáveis podem ser substituídos, uns pelos outros, em quantidades esteqüiometricamente equivalentes, ou seja, miliequivalente por miliequivalente. Assim, se forem neutralizados 2 meq/100cm^3 da acidez H + Al com carbonato de cálcio, surgem no lugar da acidez 2 meq/100cm^3 de Ca. Portanto, no caso dos catíons trocáveis, a representação em meq/100cm^3, usada em todo País, parece ser a opção lógica. O potássio, nos casos em que a necessidade de calagem é determinada através da saturação em bases, deveria ser representado desta maneira, para facilitar cálculos.

Fósforo e potássio têm sido representados em meq/100cm^3 ou meq/100ml de terra, respectivamente de PO_4^{3-} e K^+ em ppm (partes por milhão) e em μg/ml de terra ou μg/cm^3 de terra.

Para converter os resultados de meq/100cm³ a $\mu g/cm^3$, basta multiplicar por 100 no caso do fósforo (103 para maior exatidão) e por 400 no caso do potássio (391 para maior exatidão). Assim 0,10 meq/100cm³ de K^+ ou PO_4^{3-}, equivalem respectivamente a $10\mu g/cm^3$ de terra de P e 40 $\mu g/cm^3$ de terra de K.

As unidades ppm e $\mu g/cm^3$ se equivalem, desde que a primeira se refira a volume de terra. Para evitar ambigüidade, já que ppm tem sido usado indistintamente para representar $\mu g/cm^3$ e $\mu g/g$, talvez seja mais adequado utilizar $\mu g/cm^3$. Note-se que $\mu g/cm^3$ (micrograma/cm³) equivale a mg/dm³. A matéria orgânica tem sido representada em % de M.O. ou C (carbono). Para converter carbono para matéria orgânica usa-se o fator 1,724. A representação em porcentagem também pode dar margem a mal entendidos, já que também refere-se a volume de terra. Mais explícita seria a representação da matéria orgânica em g/100cm³ de terra.

Finalmente, a textura é expresa em porcentagem por peso de terra. Em geral só é determinada a argila. É comum somente a indicação da classe textural, indicando se o solo é arenoso, barrento ou franco, ou argiloso.

10.7.3. Resultados discrepantes

Muitas vezes os resultados analíticos não são os esperados. Principalmente quando é feito um acompanhamento permanente da fertilidade do solo através de análises, podem ser detectados desvios dos resultados que seriam esperados.

Outro tipo de resultados discrepantes seriam aqueles obtidos para as mesmas amostras enviadas para laboratórios diferentes ou para o mesmo laboratório em épocas distintas, que podem parecer diferentes.

Casos como esses provocam insegurança nos técnicos e desacreditam a análise de solo.

A primeira atitude a ser tomada é verificar até que ponto a interpretação dos resultados é afetada. Muitas vezes, diferenças entre resultados que podem parecer importantes, não o são do ponto de vista prático de utilização de análise do solo.

Sempre que houver dúvidas sobre resultados de análise convém investigar o caso até onde for possível. O primeiro ponto a verificar é a amostragem, confirmando se foram realmente coletados os vinte pontos por amostra.

Existem algumas variações para determinações ocasionadas por fatores estranhos à análise em si. Assim, os valores de pH podem

ser mais baixos se a amostra foi enviada úmida ao laboratório, se ela contém resíduos de adubos aplicados recentemente ou, ainda, se ela foi coletada na época mais seca do ano. Os resultados de potássio são mais baixos nos casos em que há muita vegetação no terreno. Os resultados de fósforo podem ser muito altos em solos que receberam aplicações recentes de fosfatos naturais.

Existem, também, diferenças entre resultados de laboratórios diversos. Este problema foi constatado há vários anos e têm sido organizados programas regionais com o intuito de uniformizar a metodologia e tentar reduzir ao mínimo as diferenças entre laboratórios. É um trabalho permanente de aperfeiçoamento que deverá ter continuidade.

Em casos em que as dúvidas sobre resultados persistem, o cliente deve solicitar ao laboratório a verificação dos resultados e, se necessário, a repetição das análises. Normalmente as amostras são guardadas por vários meses e é possível repetir as análises.

10.8. Interpretação dos resultados

Os resultados podem vir acompanhados das recomendações de adubação e calagem ou não. No segundo caso, a interpretação deverá ser feita de acordo com as tabelas de adubação de culturas ou com informações sobre respostas das mesmas à adubação, quando elas são disponíveis.

São úteis as considerações feitas anteriormente sobre acidez e calagem, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e nitrogênio.

Nos casos em que é feito o acompanhamento periódico das análises, é importante verificar a evolução da fertilidade com calagens e adubações praticadas anteriormente.

Em alguns solos argilosos que vem sendo adubados com fósforo, os teores podem continuar muito baixos, mas são conseguidas altas produtividades. Nesses casos, a adubação fosfatada pode ser reduzida ou pode-se considerar o teor de fósforo como sendo baixo ao invés de muito baixo (ver ítem 7.4.).

10.9. Implementação das recomendações

As recomendações são dadas em termos de calcário a aplicar e nutrientes N-P_2O_5-K_2O, em kg/ha. Acompanham informações sobre aplicação de nitrogênio em cobertura e, as vezes, recomendações para empregar enxofre ou micronutrientes. No sistema de adubação corretiva, esta é indicada à parte.

A calagem deve ser aplicada com antecedência. Para doses elevadas e solos muito ácidos, o calcário deve ser aplicado metade antes da aração e metade depois, seguida de incorporação com grade. A incorporação com enxada rotativa também é eficiente, embora predisponha mais o solo à erosão. Um erro muito comum é a aplicação do calcário pouco antes do plantio e com incorporação muito superficial, com o que se perde no primeiro ano a maior parte dos benefícios da calagem.

A adubação corretiva, quando recomendada, deve também ser aplicada com o calcário, bem misturada ao solo. Uma grande antecedência de aplicação ao plantio, porém, só é interessante quando forem utilizados fosfatos naturais.

Para a adubação de plantio devem ser escolhidos adubos simples ou fórmulas, que atendam aproximadamente ao que foi recomendado. O mesmo vale para a cobertura com nitrogênio. É preciso aplicar enxofre com algum dos adubos, quando o nutriente for recomendado.

É na implementação que está um dos pontos fracos da adubação com base na análise de solo. São freqüentes aplicações de quantidades de nutrientes que diferem bastante das que devem ser aplicadas.

Alguns desvios são bastante generalizados e devem-se em parte a hábitos de adubação que não têm sofrido ajustes, a medida que a fertilidade do solo vem-se alternando pelas adubações praticadas. Talvez o caso mais comum seja a utilização de fórmulas muito ricas em fósforo, como ocorre com freqüência no sistema soja-trigo ou para algodão.

Em culturas intensivas, frutíferas, olerícolas, batatinha e outras, não é raro a aplicação de quantidades excessivamente altas de fertilizantes. Aplicar excesso de fertilizantes pouco adianta, porque as culturas só respondem até um certo nível de produção, além do qual a adubação pode até prejudicar (ver ítens 4.2. e 4.4.).

Em culturas de subsistência acontece o contrário. Há um uso insuficiente de fertilizantes, o que se deve em grande parte a problemas de ordem econômica, principalmente de disponibilidade de capital, já que em muitos casos o retorno pela adubação seria muito favorável.

Dentro dessa atitude de aplicar doses baixas de fertilizantes, têm sido cometidos alguns erros sérios, principalmente na omissão da cobertura com nitrogênio que, em certos casos, é responsável pela maior parte da produção. Isto não deve ser feito. Se houver necessidade de aplicar quantidades menores de fertilizantes, é mais conveniente reduzir proporcionalmente a adubação de plantio e a cobertura.

10.10. Variações de teores no solo através de adubações e calagem

Na tabela 10.2. são dadas as variações de nutrientes esperadas pela adição de calcário ou fertilizantes. São apresentados os máximos teóricos e observações sobre as variações que se podem esperar na realidade.

Tabela 10.2. Variações teóricas de nutrientes a serem esperadas pela adição dos mesmos em adubações e calagens

Quantidade adicionada	Teor no solo			
	Total adicionado		Quantidades que aparecem (1)	
kg/ha x 20cm	µg/cm^3	meq/100cm^3	µg/cm^3	meq/100cm^3
24 de K_2O ou 20 de K	10	0,025	5	0,012
46 de P_2O_5 ou 20 de P	10	0,10	< 0,5	–
1000 de $CaCO_3$ ou 560 de CaCO ou 400 de Ca	200	1,0	– –	0,5
842 de $MgCO_3$ ou 402 de MgO ou 242 de Mg	121	1,0	– –	0,5

(1) São valores que variam bastante de solo para solo e dependendo do manejo. Os números sugeridos seriam obtidos após uma colheita e admitem considerável variação. Eles são apresentados para facilitar a adequação periódica de calagens e adubações com base em modificações esperadas nos resultados de análises e as modificações observadas.

Para o fósforo são necessárias, em muitos solos, adições de centenas de quilogramas de P_2O_5 por hectare para elevar os teores do elemento a níveis médios ou altos, maiores quantidades em solos mais argilosos.

Para potássio, cálcio e magnésio, os valores obtidos aproximam-se da metade do teórico esperado ou um pouco mais, desde que não tenha havido remoção por plantas, que é elevada no caso do potássio.

SUMMARY

EVALUATION OF SOIL FERTILITY

The evaluation of soil fertility as it is nowaday practiced in Brazil is described in this publication.

In chapter 2 some aspects of the soil constitution are discussed, including a definition of soil, particle size distribution, porosity and aggregation, water retention, aeration, soil minerals and organic matter.

The subjects of chapter 3 are soil solution, retention ad exchange of ions, origin of ion exchange, cation-exchange equilibrium adsorption of phosphate and biological processes involving nitrogen.

In chapter 4 the discussion deals with the concepts on availability of nutrients in soils, response curves, the «law of minimum», the «law of diminishing increments», the percentage of sufficiency, the mobility of nutrients, interaction of production factors and the most economical amounts of fertilizers.

In chapter 5 some aspects of experiments with plants, statistical analysis of experimental results, soil testing and plants analysis are discussed. The steps of a soil testing program include sampling, selection of methods of analysis, correlations between crop responses and results of soil analysis, establisment of classes for interpretation of results and levels of fertilization.

Under acidity and liming, in chapter 6, concepts and origin of soil acidity are discussed. The determination of lime requirement is based on either of three methods, based on the neutralization of aluminum, the increase of soil pH or the increase of base saturation of the cation exchange capacity.

In chapter 7 factors affecting the availability of phosphorus and methods for the extraction of soil P are discussed. The correlation between soil P and crop responses to applied phosphorus is shown for soybean, corn and sugar cane and response curves are given for the two first crops to applied phosphorus.

The availability of potassium, calcium and magnesium is discussed in chapter 8. Correlations between exchangeable K and crop responses to applied potassium are given for corn, cotton, beans, sugar cane and soybean.

The difficulties of soil testing for nitrogen are discussed in chapter 9. Responses of cotton and corn to applied nitrogen. Could not be correlated with soil organic matter. Response curves to nitrogen are shown for sugar cane, corn, beans, cotton and wheat.

Practical aspects of the use of soil testing are discussed in chapter 10, concerning informations that should be considered, laboratories, sampling problems, interpretation of the results, implementation of the recommendations and expected variation in soil test results with liming and fertilization.

LITERATURA CITADA [1]

ANDA. Manual de adubação, 2.a ed. Associação Nacional para Difusão de Adubos, São Paulo, 1975. 346p.

BARBER, S.A. & OLSON, R.A. Fertilizer use on corn. **In:** Nelson, L.B. (ed.), Changing patterns in fertilizer use. p.163-188. Amer. Soc. Agron. Madison, Wisc. 1968.

BRAY, R.H. Correlation of soil tests with crop response to added fertilizers and with fertilizer requirements. **In**: Kitchen, H.B. (ed.), Diagnostic techniques for soils and crops. p.53-86. Amer. Potash Institute, Washington, 1948.

CAMPOS, H. & GOMES, F.P. As interações em grupos de experimentos de adubação de milho. Rev. Agricultura, Piracicaba, 51: 5-16, 1976.

CATANI, R.A. & GALLO, J.R. Avaliação da exigência em calcário dos solos do Estado de São Paulo mediante correlação entre pH e a porcentagem de saturação em bases. Revista de Agricultura, Piracicaba, 30:49-60, 1955.

CATANI, R.A.; GALLO, J.R. & GARGANTINI, H. Amostragem de solo, métodos de análise, interpretação e indicações gerais para fins

---

[1] Não são incluídas referências das fontes de informações usadas em tabelas e figuras. Nesses casos as citações foram feitas com as tabelas e figuras, exceto os casos que também são citados no texto.

de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico, 1955. 22p. (Boletim 69).

CATANI, R.A. & GARGANTINI, H. Extração do fósforo do solo pelo método Neubauer e por métodos químicos. Bragantia 13: 55-62, 1954.

CATE, R.B. Jr. & NELSON, L.A. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. North Carolina Agric. Exp. Stn., International Soil Testing Series Tech. Bull. n.º 1, 1965.

COREY, R.B. Factors affecting the availability of nutrients to plants. **In:** Walsh, L.M. & BEATON, J.D. (ed.), Soil testing and plant analysis. p.23-33. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisc., 1973.

DAHNKE, W.C. & VASEY, E.H. Testing soils for nitrogen. **In:** WALSH, L.M. & BEATON, J.D., Soil testing and planta analysis. p.97-114. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisc. 1973.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. An introduction to the rock-forming minerals. John Wiley and Sons Inc., New York, 1969. 528p.

DIEST, A. van. Factors affecting the availability of potassium in soils. **In:** Potassium Research-review and trends. Proc. 11th Congr. Intern. Potash Institute, 1978. p.75-97. International Potash Institute, 1978.

DOLL, E.C. & LUCAS, R.E. Testing soils for potassium, calcium, and magnesium. **In:** WALSH, L.M. & BEATON, J.D., Soil testing and plant analysis. p.133-151. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisc., 1973.

GRIMME, H. & NÉMETH, K. The evaluation of soil K status by means of soils testing. **In:** Potassium research-review and trends, Proc. 11th Congr. Intern. Potash Institute, 1978. p.99-108. International Potash Institute, 1978.

HARMSEN, G.W. & KOLENBRANDER, G.J. Soil inorganic nitrogen. **In:** BARTOLOMEW, W.V. & CLARK, F.E. (ed.), Soil nitrogen. p.43-92. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, 1965.

IGUE, T.; MASCARENHAS, H.A.A. & MIYASAKA, S. Estudo comparativo dos métodos de Mitscherlich e do trinômio do segundo grau, na determinação das doses mais econômicas de fertilizantes, na adubação do feijoeiro. Instituto Agronômico, Campinas. Projeto BNDE/ANDA/CIA, Boletim N.º 4, 1971. 15p.

LEPSCH, I.F. Solos — formação e conservação. Edições melhoramentos, São Paulo. 2.a edição, 1976. 160p.

MALAVOLTA, E. Manual de química agrícola. Nutrição de plantas e fertilidade do solo. Editora Agronômica Ceres Ltda. São Paulo, 1976. 528p.

McLEAN, E.O. Contrasting concepts in soil test interpretation: sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. **In:** STELLY, M., Soil testing: correlating and interpreting the analytical results. p.39-54. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, 1977.

MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Berna, Suiça, 1978. 593p.

MIELNICZUK, J. O potássio no solo. Instituto da Potassa-Fosfato (EUA) e Instituto Internacional da Potassa (Suiça), Boletim Técnico 2. 1978. 80p.

RAIJ, B. VAN. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. R. bras. Ci. Solo 2: 1-9, 1978.

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

RUSSELL, E.W. Soil conditions and plant growth. 10th edition. Longman, London, 1973. 849p.

SCHOFIELD, R.K. A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. *Proc. 11th Int. Congr. pure appl. Chem.*, London, 3:257-261, 1947.

SMITH, C.M. Interpreting inorganic nitrogen soil testes: sample depth, soil water, climate, and crops. **In:** STELLY, M. (ed.) Soil testing: correlating and interpreting the analytical results. p.85-98. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, 1977.

TISDALE, S. & NELSON, W. Soil fertility and fertilizers. Third edition. Collier MacMillan International Editions, New York, 1975. 694p.

THOMAS, G.W. & PEASLEE, D.E. Testing soil for phosphorus. **In:** WALSH, L.M. & BEATON, J.D., Soil testing and plant analysis. p.115-132. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisc., 1973.

VERDADE, F. da C. Estudo da variabilidade dos nitratos num solo tipo terra roxa misturada. Bragantia 11: 269-276, 1951.

WALSH, L.M. & BEATON, J.D. Soil testing and plant analysis. Revised edition. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1973. 491p.

Impresso nas Oficinas
da
EDITORA "AVE MARIA" LTDA.
C.E.P. 01226 — Rua Martim Francisco, 656
Vila Buarque
Tel.: 826-6111 — Inscr. Mun. 0.221.653-1
Inscr. Est. 101.067.554 — CGC 60.494.200/0001-70
São Paulo

Institutos da Potassa (EUA - SUIÇA)
Rua Alfredo Guedes n.º 1949 - Sala 701
Caixa Postal 400
13.400 — Piracicaba — SP, Brasil