

INTRODUÇÃO A FERTILIDADE DO SOLO¹

Aula ministrada no Curso de Manejo e Conservação do Solo e da Água promovido pela superintendência Federal de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Estado da Bahia – SFA -BA/SDC/MAPA, no auditório da UFBA, em Barreiras-BA, no período de 29/05 a 01/06/2007.

Alessandra Monteiro Salviano Mendes
Pesquisadora A – Embrapa Semi-Árido
amendes@cpatsa.embrapa.br

¹ material preparado a partir de textos didáticos da disciplina SOL 671 oferecida pelo Departamento de Solos da UFV no Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

1. Introdução a Fertilidade do Solo

1.1. Elementos Essenciais e Benéficos

1.1.1. Introdução

Ao analisar-se quimicamente um solo, inúmeros elementos podem ser encontrados na amostra e, de forma semelhante, o mesmo pode ser observado nos vegetais superiores. De maneira geral, qualquer elemento que se encontre na forma disponível pode ser absorvido. No entanto, a presença de um elemento químico no tecido vegetal não implica que este seja fundamental para a nutrição da planta. Em decorrência a este fato, foi necessário separar os elementos que são essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, daqueles que sem ser essenciais, são benéficos. Para tanto, foram definidos os critérios de essencialidade dos nutrientes.

1.1.2. Critérios da Essencialidade

Para que um elemento seja classificado como essencial, deve satisfazer alguns critérios (Arnon & Stout, 1939):

- a) A ausência do elemento impede que a planta complete seu ciclo;
- b) A deficiência do elemento é específica, podendo ser prevenida ou corrigida somente mediante seu fornecimento;
- c) O elemento deve estar diretamente envolvido na nutrição da planta, sendo que sua ação não pode decorrer de correção eventual de condições químicas ou microbiológicas desfavoráveis do solo ou do meio de cultura, ou seja, por ação indireta.

Epstein (1975), de maneira simples e direta, funde os dois últimos critérios em apenas um, mais objetivo:

- O elemento faz parte da molécula de um constituinte essencial à planta.

Um exemplo clássico de um elemento que satisfaz este critério é o Mg, que toma parte da molécula de clorofila.

Desde o início do Século XX foram realizadas inúmeras pesquisas visando à caracterização dos elementos fundamentais para o ciclo vital das plantas. Com o desenvolvimento dos cultivos em soluções hidropônicas ou, simplesmente, técnica de hidroponia, as pesquisas puderam rapidamente evoluir tornando-se mais fácil à supressão de um determinado elemento e a tentativa de sua substituição por outro, prática fundamental para a caracterização de essencialidade de um elemento.

1.1.3. Macro e Micronutrientes

Como todo ser vivo, as plantas necessitam de água e de diferentes moléculas orgânicas para sua sobrevivência. Portanto, os elementos que compõem a água (H₂O) e qualquer molécula orgânica (C, O, H) obviamente têm sua essencialidade totalmente comprovada. Esses elementos são absorvidos pelas plantas a partir da água absorvida pelas raízes e do CO₂ absorvido via fotossíntese.

Juntamente a esses três elementos, mais seis são absorvidos e exigidos em quantidades superiores aos demais: nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), formando os chamados macronutrientes. Já os micronutrientes, que são exigidos em quantidades inferiores aos nove anteriormente citados, são: ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B) molibdênio (Mo) e cloro (Cl).

Cerca de 90 % da matéria seca de uma planta consiste de C, H e O (Quadro 1). De maneira geral, no estudo da fertilidade do solo esses três elementos não são considerados, uma vez que o solo não é a maior fonte destes, como comentado anteriormente.

A separação entre macro e micronutrientes é principalmente didática, pois esta separação quantitativa pode variar entre as diferentes espécies. Plantas como palmeiras (*Cocos nucifera* L) ou cebola (*Allium cepa* L) podem apresentar em seus tecidos o Cl em concentrações equivalentes ou superiores a de alguns macronutrientes como P e Mg, por exemplo.

Quadro 1 - Faixa de concentração média de elementos essenciais da matéria seca de um vegetal*.

Elemento	Teor	Elemento	Teor	Elemento	Teor
	dag/kg		dag/kg		dag/kg
Carbono	42	Nitrogênio	2,0 - 3,5	Cálcio	1,0 - 2,5
Oxigênio	44	Fósforo	0,12 - 0,22	Magnésio	0,2 - 0,4
Hidrogênio	6	Potássio	1,5 - 3,0	Enxofre	0,2 - 0,3
Fe + Zn + Mn + Cu + B + Mo + Cl				0,5 - 1,5	

* Valores médios podendo variar de acordo com características de cada espécie e do meio em que ela se encontra.

dag/kg = %

1.1.4. Elementos Benéficos

Com a evolução das pesquisas na área de nutrição mineral de plantas, foram identificados alguns elementos que podem ser considerados essenciais para algumas espécies ou mesmo substituir parcialmente a função de elementos essenciais. Outros,

quando em concentrações muito baixas, estimulam o crescimento de plantas, porém sua essencialidade não é demonstrada ou, apenas demonstrada sob determinadas condições especiais. Esses elementos têm sido classificados como elementos benéficos.

Existem casos em que o efeito positivo do elemento no crescimento da planta decorre de aumento da resistência a pragas e a doenças, ou favorecem a absorção de outros elementos essenciais.

São considerados elementos benéficos Al, Co, Ni, Se, Si, Na, V.

1.2. Funções dos Nutrientes

1.2.1. Funções dos Elementos Essenciais

1.2.1.1. Nitrogênio (N)

O N geralmente é exigido em grandes quantidades pelos vegetais, encontrando-se em concentrações que variam de 1 a 5 dag/kg da matéria seca. De maneira geral, é observado em maiores concentrações nos tecidos das espécies pertencentes à família *Leguminosae*.

Para a maioria das culturas, sua absorção ocorre preferencialmente na forma de NO_3^- , exceto em solos sob condições adversas a nitrificação. Uma vez absorvido o NO_3^- é reduzido e incorporado em compostos orgânicos.

Sua forma mais abundante é como um peptídeo ligado as proteínas, uma ligação muito estável graças a sua configuração eletrônica que permite fortes ligações covalentes com dois átomos adjacentes de C. Assim, o N é constituinte de aminoácidos, nucleotídeos, coenzimas, clorofila, alcalóides, e outros.

Na ausência desse elemento, o principal processo bioquímico afetado na planta é, justamente, a síntese protéica, com conseqüências no seu crescimento. O amarelecimento ou clorose das folhas mais velhas, como sintoma de deficiência de N, decorre da inibição da síntese de clorofila. Plantas com excesso de N apresentam folhas de coloração verde escura, com folhagem succulenta, tornando-a mais suscetível às doenças e ataque de insetos ou déficits hídricos.

O N apresenta interações com P, S e K. A absorção de NO_3^- estimula a absorção de cátions, enquanto que a absorção de NH_4^+ pode restringir a absorção de cátions como o Ca^{2+} por exemplo.

1.2.1.2. Fósforo (P)

O P, apesar de seu papel fundamental como componente energético, sua concentração nos tecidos vegetais pode variar de 0,10 a 1,0 dag/kg da matéria seca,

sendo que a faixa de suficiência para a maioria das culturas pode variar de 0,12 a 0,30 dag/kg. Da solução do solo, é absorvido nas formas aniônicas (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}), as quais apresentam uma forte ligação covalente com o átomo de O, que é mantida mesmo após sua incorporação aos tecidos vegetais. Ao ligar-se a átomos de C, forma complexos polifosfatados como adenosina trifosfato (ATP) e adenosina difosfato (ADP), vitais para o metabolismo energético, ou seja, para processos de conversão de energia nas plantas.

Além de formar ATP e ADP, o P atua em outras funções vitais. Participa de reações de esterificação com açúcares e outros compostos envolvidos na fotossíntese e na respiração. Componente dos ácidos ribonucléicos (DNA e RNA) e formando fosfolípídeos nas membranas, sua maior concentração pode ser observada nas sementes e frutos. O P pode apresentar interações com N, S e micronutrientes como: Cu, Fe, Mn e Zn.

A carência de fósforo causa distúrbios severos no metabolismo e desenvolvimento das plantas, levando a menor perfilhamento em gramíneas, redução no número de frutos e sementes. Inicialmente, em folhas mais velhas, a deficiência de P mostra-se sob a forma de clorose, ou redução no brilho e um tom verde-azulado. Os sintomas de excesso aparecem, principalmente, na forma de deficiência de micronutrientes, como Fe e Zn.

1.2.1.3. Enxofre (S)

Assim como o P e a maior parte do N, o S é absorvido do solo sob a forma aniônica de sulfato (SO_4^{2-}) e, posteriormente, reduzido e incorporado a compostos orgânicos. Pode ser encontrado em concentrações que variam de 0,1 a 0,4 dag/kg, não sendo incomum apresentar-se em valores superiores ao P.

Como o N, sua estrutura química permite a formação de ligações covalentes estáveis, principalmente com o C e com outros átomos de S. A ligação estável com o C nos aminoácidos cisteína (-C-SH), metionina (-C-S-CH₃) e cistina (-C-S-S-C) que formam as proteínas, compõem a maior parte do S contido nas plantas.

Quando o fornecimento de sulfato é grande, sua absorção pode ser mais rápida que sua redução e assimilação em compostos orgânicos. Fração apreciável do S total pode, por isso, estar na forma de sulfato - uma fração maior que a correspondente ao nitrato em relação ao N total.

O S pode apresentar interações notadamente com o N, P, B e Mo.

Plantas deficientes em S tornam-se cloróticas devido a redução da biossíntese de proteínas que formam complexos com a clorofila nos cloroplastos. A deficiência de S pode, ainda, levar a um baixo nível de carboidratos e a um acúmulo das frações

nitrogenadas solúveis como o nitrato. Dessa forma, observa-se, além da redução da fotossíntese (devido ao baixo nível de carboidratos), a impossibilidade dos substratos nitrogenados serem utilizados na síntese de proteínas. Dada a baixa mobilidade interna do S, a sintomatologia de sua deficiência normalmente é inicialmente manifestada em tecidos mais jovens.

1.2.1.4. Potássio (K)

A concentração de K nos tecidos vegetais pode apresentar grande variabilidade em função da espécie e do manejo cultural utilizado. Valores mais comumente encontrados situam-se na faixa de 1,0 a 3,5 dag/kg. Seu papel tem pouco em comum com o desempenhado pelo N, P e S. Sua estrutura química não conduz à formação de ligações covalentes e, portanto, não forma complexos de grande estabilidade. Assim como o P, e contrariamente ao que ocorre com o N e com o S, durante sua assimilação não sofre alteração em seu estado redox, permanecendo na mesma forma iônica em que foi absorvido.

Seu principal papel é o de ativador enzimático, com participações no metabolismo protéico, fotossíntese, transporte de assimilados e potencial hídrico celular. Como principal componente osmótico das células guardas, a transferência de K dentro e fora destas células regula a abertura e o fechamento dos estômatos. Junto com Ca e Mg participa da importante função de manutenção do equilíbrio iônico com os ânions.

Como ativador de inúmeras enzimas, sua deficiência conduz a profundas alterações no metabolismo. Compostos nitrogenados solúveis acumulam-se, indicando a redução na síntese protéica. Em condições de deficiência de K, as plantas tendem a apresentar diminuição da dominância apical, internódios mais curtos e clorose seguida de necrose das margens e pontas de folhas mais velhas.

1.2.1.5. Cálcio (Ca)

O Ca é comumente encontrado nos tecidos vegetais em concentração que pode variar entre 0,5 a 3 dag/kg da matéria seca. A maior parte do Ca nas plantas ocorre formando ligações intermoleculares nas paredes celulares e membranas, contribuindo, assim, para a estabilidade estrutural e o movimento intercelular de vários metabólitos. Atua, ainda, como catalisador de várias enzimas.

Níveis adequados de Ca ajudam a planta a evitar estresse decorrente da presença de metais pesados e, ou, salinidade. A substituição do cálcio por metais pesados pode causar um desequilíbrio estrutural e alterar a rigidez estrutural da parede celular. Apresenta interações com Mg e K a ponto de um excesso do nutriente promover deficiências nos últimos

Como o Ca não se movimenta via floema, sua redistribuição entre os órgãos da planta praticamente não ocorre, podendo existir, simultaneamente, carência do elemento nas partes mais novas da planta e excesso nas partes mais velhas. Dessa forma, a deficiência de Ca mostra-se inicialmente nos tecidos mais jovens.

1.2.1.6. Magnésio (Mg)

A concentração de Mg nos tecidos dos vegetais pode variar de 0,15 a 1,0 dag/kg da matéria seca. Mais da metade do Mg contido nas folhas pode estar formando clorofila, já que esta possui um átomo central de Mg. Além de seu papel na clorofila, o Mg é ativador das enzimas relacionadas com o metabolismo energético, além de servir de ligação entre as estruturas de pirofosfato do ATP e ADP. Apresenta interações com Ca e K.

A deficiência de Mg afeta parte do metabolismo das plantas, sendo a clorose internerval das folhas velhas o sintoma inicial, seguido da redução da fotossíntese decorrente da menor síntese de clorofila. Em casos extremos de deficiência, são observadas necroses inclusive nas folhas novas.

1.2.1.7. Ferro (Fe)

O Fe é constituinte de inúmeros metabólitos, podendo ser parte integrante de proteínas (ferredoxinas p.e.) e de enzimas mitocondriais relacionadas com o transporte de elétrons, ou mesmo cofator de outras enzimas. Participa da redução do nitrato e do sulfato e da produção de energia. Sendo essencial para a síntese de clorofila, podem ser observadas correlações significativas entre o teor de Fe e de clorofila na planta. Esse fato proporciona certa semelhança entre as deficiências de Mg e de Fe, sendo, contudo, a deste último manifestada inicialmente nas folhas novas, dada a pouca mobilidade do Fe na planta. Em casos extremos a folha inteira pode apresentar clorose intensa manifestada por um branqueamento foliar. Sua concentração normal em plantas cultivadas pode variar de 50 a 150 mg/kg na matéria seca de folhas.

Elevadas concentrações de P na planta reduzem a solubilidade interna do Fe.

1.2.1.8. Zinco (Zn)

Atuando como constituinte de algumas enzimas (desidrogenases, p. e.) ou como cofator destas, sua faixa de concentração normal nos tecidos foliares pode variar de 27 a 150 mg/kg na matéria seca, conforme a espécie. Sua deficiência talvez seja uma das que mais afeta o crescimento de plantas, resultando em pequena expansão foliar e encurtamento dos internódios (formação de "roseta"). Essa

manifestação deve-se a seu papel na síntese de triptofano, importante aminoácido precursor das auxinas.

O P pode interferir no metabolismo de Zn assim como em sua absorção pelas raízes. Altas concentrações de Zn podem induzir deficiências de Fe.

1.2.1.9. Manganês (Mn)

Com concentração variando entre 20 e 100 mg/kg na matéria seca de folhas, o Mn atua como ativador de muitas enzimas. Está envolvido em processos de oxidação e redução no sistema de transporte de elétrons. Sua deficiência tem efeito direto na respiração, podendo, ainda, afetar a formação de vários metabólitos. Os sintomas manifestam-se inicialmente nas folhas novas na forma de clorose internerval, ou de pequenas manchas necróticas ou mesmo de, até, dimorfismo foliar.

1.2.1.10. Cobre (Cu)

Assim como o Zn, o cobre atua como constituinte e cofator de enzimas, participa do metabolismo de proteínas e de carboidratos e na fixação simbiótica de N_2 . Concentrações foliares normais podem variar de 5 a 30 mg/kg. Dada sua pouca mobilidade interna, sua deficiência inicialmente manifesta-se como clorose nas pontas e margens, encurvamento das folhas mais novas, permitindo que as nervuras fiquem mais salientes. Observa-se, ainda, acúmulo de compostos nitrogenados solúveis e menor absorção de O_2 .

O cobre pode interferir no metabolismo do Fe, resultando no desenvolvimento de deficiências de Fe.

1.2.1.11. Boro (B)

Existindo nas plantas na forma do ânion borato (BO_3^{3-}) o principal papel do B nas plantas é o de regulador do metabolismo de carboidratos. Acredita-se que seja importante na síntese de uma das bases que forma o RNA (uracil). Está associado à germinação do pólen e à formação do tubo polínico. Sua concentração foliar pode variar de 1 a 6 mg/kg nas monocotiledôneas; de 20 a 70 mg/kg nas dicotiledôneas e de 80 a 100 mg/kg nas dicotiledôneas produtoras de látex. Sintomas de deficiência podem ser identificados pela formação de folhas de menor tamanho, com clorose irregular, deformadas, quebradiças e morte do meristema apical, entre outros. Elevadas concentrações de Ca na planta podem proporcionar maior requerimento de B.

1.2.1.12. Molibdênio (Mo)

O Mo está envolvido com várias enzimas, principalmente naquelas que atuam na fixação de N_2 atmosférico (nitrogenase) e na redução do nitrato (nitrato-redutase).

Plantas dependentes da simbiose ou aquelas nutridas apenas por nitrato, quando ausente o Mo, apresentam deficiência de N. O teor foliar de Mo normalmente é inferior a 1 mg/kg na matéria seca. Os sintomas de deficiência manifestam-se sob a forma de clorose geral, manchas amarelo-esverdeadas em folhas mais velhas, seguida de necrose. Podem ser observados, ainda, murchamento das margens e encurvamento do limbo foliar.

1.2.1.13. Cloro (Cl)

O Cl não é encontrado em nenhum metabólito em plantas superiores. Sua atuação parece estar relacionada a um papel de neutralizador de cátions e do equilíbrio osmótico de planta. Existem evidências de que o elemento esteja envolvido na evolução do oxigênio nos processos fotossintéticos. Plantas como coqueiro e dendê são muito responsivas ao cloro, podendo, nessas plantas, apresentar-se em concentrações foliares de até 2 dag/kg de matéria seca. Como sintomas de sua deficiência podem ser observados redução do tamanho de folhas, clorose de folhas novas, bronzeamento e necrose.

1.2.2. Funções dos Elementos Benéficos

1.2.2.1. Alumínio (Al)

O Al é reconhecidamente um elemento tóxico para inúmeras espécies cultivadas. No entanto, trabalhos empregando solução nutritiva purificada procuraram demonstrar efeito benéfico do elemento quando suprido em baixas concentrações. Asher (1991) cita exemplos de trabalhos clássicos que demonstram efeitos benéficos do Al, tanto em plantas acumuladoras desse elemento (chá, *Camellia sinensis* L.), como no milho, onde a concentração de 7,4 μmol de Al/L na solução nutritiva resultou em aumento da produção de matéria seca.

A literatura é vasta de trabalhos que procuram caracterizar o elemento como benéfico, quando suprido em baixas concentrações, no entanto, nos módulos seguintes o enfoque prioritário será com relação à sua toxicidade às plantas e sua capacidade de gerar acidez no solo.

1.2.2.2. Cobalto (Co)

O Co pode ser encontrado nas folhas dos vegetais em concentrações que variam de 0,03 a 1,0 mg/kg de matéria seca. Condições especiais de solos ricos em Co podem propiciar o acúmulo nos tecidos de algumas espécies a teores de 0,2 a 0,4 dag/kg.

Existem evidências de que o elemento seria essencial para leguminosas em associação simbiótica com bactérias fixadoras de N_2 atmosférico. O Co é tido como elemento importante na síntese de vitamina B_{12} , a qual, provavelmente, é importante para a síntese da leghemoglobina. Essa proteína possui papel primordial na manutenção do ambiente redutor nos nódulos, necessário à fixação do N_2 pelas bactérias do gênero *Rhizobium*.

1.2.2.3. Níquel (Ni)

Diferentes pesquisas têm demonstrado a capacidade do Ni em prevenir e reduzir a infecção de plantas por fungos que promovem a ferrugem em trigo. Entretanto, sua utilização como fungicida é restrita pois se trata de um metal pesado.

De acordo com resultados de trabalhos com diferentes espécies submetidas a soluções com ou sem Ni, e pela detecção desse elemento na urease contida nos tecidos vegetais, alguns autores propuseram a inclusão do elemento na lista dos essenciais.

1.2.2.4. Selênio (Se)

O Se encontra-se nos tecidos vegetais em concentrações inferiores a 1 mg/kg. Em solos com elevada disponibilidade do elemento, espécies forrageiras podem apresentar concentrações excessivamente elevadas a ponto de serem constatados casos de toxicidade em animais.

Quanto a seus efeitos benéficos, existem poucos casos na literatura com relatos de respostas positivas, os quais se restringem a poucas espécies e em concentrações muito baixas.

1.2.2.5. Silício (Si)

O Si é elemento abundante na litosfera e, por isso mesmo, os trabalhos que procuram determinar sua essencialidade, ou mesmo efeitos benéficos ao crescimento, requerem especiais precauções quanto à contaminação.

Grande diversidade de efeitos benéficos do Si tem sido descrita para diferentes espécies. Resistência à infecção por fungos, a ataques de insetos, e à toxidez de Mn são exemplos clássicos. A deposição de SiO_2 na parede celular de folhas e do caule, de cana-de-açúcar, de arroz e de sorgo, parece conferir considerável rigidez a essas estruturas.

Ensaio utilizando solo demonstraram efeitos indiretos do Si no crescimento de plantas. Aumento da disponibilidade de P e decréscimo na solubilidade de Al e de metais pesados são exemplos. No entanto, evidências claras de sua essencialidade não foram observadas.

1.2.2.6. Sódio (Na)

O Na não é considerado um nutriente essencial para a maioria das plantas, mas para algumas espécies pertencentes ao gênero *Atriplex* encontrados na Austrália e no Chile sua essencialidade tem sido demonstrada. Alguns trabalhos sugerem que o Na, quando em baixas concentrações, propicia maior crescimento a plantas C₄.

Na realidade, o íon Na⁺ tem-se mostrado capaz de substituir o K⁺ em algumas funções relacionadas com o equilíbrio iônico interno das plantas.

Mais comentários sobre o Na poderão ser encontrados no módulo referente a correção de solos sódicos.

1.2.2.7. Vanádio (V)

Os efeitos benéficos do V são citados em maior intensidade apenas para vegetais inferiores. Poucas referências citam efeitos benéficos em milho quando suprido por solução nutritiva contendo 0,25 mg/L (Singh, 1971; Tisdale & Nelson, 1975).

1.3. Conceito de Fertilidade do Solo

1.3.1. Considerações Gerais

Ao longo do tempo, tem-se visto numerosas tentativas de se conceituar a fertilidade do solo. Entretanto, sempre existiu a tendência de se expressar a fertilidade do solo em termos de produtividade, de se utilizar, indiscriminadamente, os termos fertilidade e produtividade (produção por unidade de área) como sinônimos. Com o desenvolvimento de técnicas analíticas, o homem adquiriu maior facilidade e capacidade preditiva da disponibilidade dos nutrientes, fato que lhe permitiu desvincular, parcialmente, a produção da planta da fertilidade do solo como índice para medir a quantidade de nutrientes passíveis de serem absorvidos.

Para esclarecer a diferença entre produtividade e fertilidade, suponha-se que um solo fértil gere altas produções de algodão na época de verão, quando as temperaturas são elevadas, existe suficiente água disponível e os dias são mais longos. Sem dúvida, no inverno sucederá o contrário e os rendimentos cairão substancialmente. Pode-se, então, perguntar qual o motivo dessa queda, pois a fertilidade do solo não foi responsável por este menor rendimento, já que ela permanece adequada. Pode-se concluir que o uso de um solo fértil nem sempre implica na obtenção de alta produtividade, pois se têm casos de solos férteis com impedimentos físicos, que provocam restrições ao transporte e ao desenvolvimento do

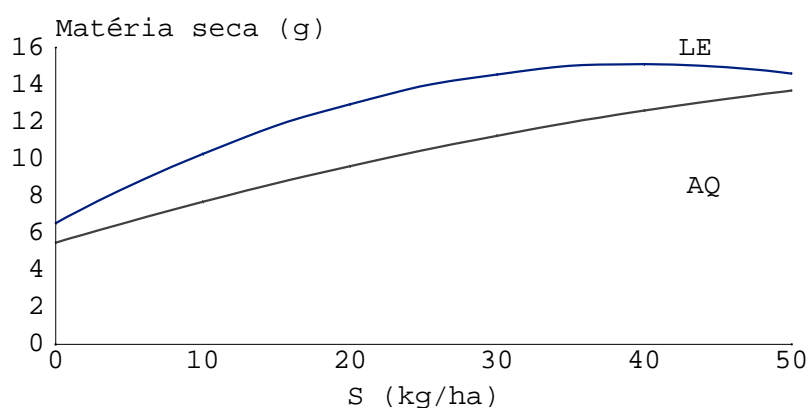
sistema radicular, em razão de altos teores de argila, de declividade pronunciada, de elevada pedregosidade, de alta compactação etc.

Por outro lado, um solo produtivo deve apresentar fertilidade elevada, ou ter sido, previamente, corrigido.

A fertilidade tem sido conceituada como "a capacidade do solo de ceder elementos essenciais às plantas" (Raij, 1981; Braga, 1983). Alguns autores (Malavolta, 1976; Raij, 1981) acrescentam que esta capacidade, para não apresentar limitações, deva ser mantida durante todo o crescimento e desenvolvimento da planta, mesmo que esta deixe de absorver ou utilizar, numa determinada fase de seu ciclo. A produtividade encontra, portanto, na fertilidade do solo, variável determinante de seu dimensionamento, apenas por limitação quando ela é deficiente.

Além das condições físicas e microbiológicas, a fertilidade é um componente do fator solo na equação de produção ($\text{Produção} = f(\text{solo, clima, planta e manejo})$) que envolve além desses fatores, outros como a mineralogia e a química.

O conceito de fertilidade do solo apresenta várias limitações importantes em sua interpretação. Assim, por exemplo, a resposta em produção de uma planta pode ser diferente quando se aplicam doses crescentes de um nutriente em solos diferentes, conforme se observa na Figura 1, onde o solo LE tem maior produtividade refletindo aparentemente, maior capacidade para ceder elementos essenciais.

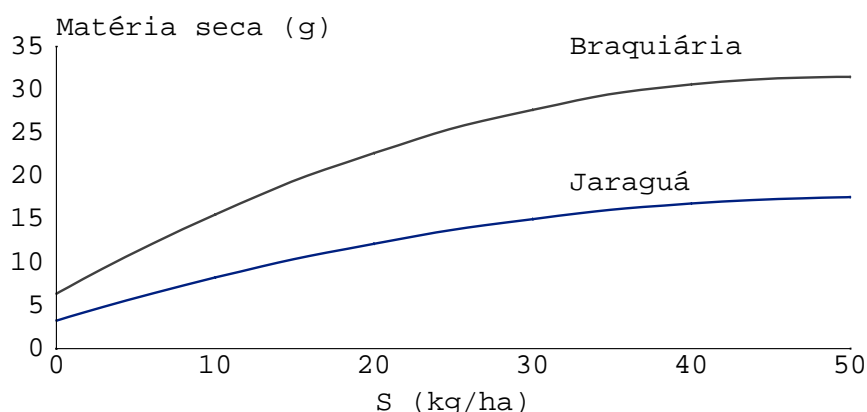


$$\text{LE: } \hat{Y} = 6,5386 + 0,4265X - 0,0053X^2 \quad R^2 = 0,996$$

$$\text{AQ: } \hat{Y} = 5,4869 + 0,2341X - 0,0014X^2 \quad R^2 = 0,975$$

Figura 1 - Produção da matéria seca de capim jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) em resposta à aplicação de cinco doses de enxofre em um Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e uma Areia Quartzosa (AQ). FONTE: Casagrande & Souza, 1982.

Da mesma forma, um solo de definido nível de fertilidade pode apresentar diferente produção com diferentes espécies de plantas (Figura 2), posto que as plantas variam em sua capacidade de absorção e de utilização de um mesmo nutriente (Epstein, 1975; Malavolta, 1976; Sanchez, 1981; Mengel & Kirby, 1982).



$$\text{Braquiária: } \hat{Y} = 6,3691 + 1,0225X - 0,0104X^2 \quad R^2 = 0,999$$

$$\text{Jaraguá: } \hat{Y} = 3,2609 + 0,5510X - 0,0053X^2 \quad R^2 = 0,998$$

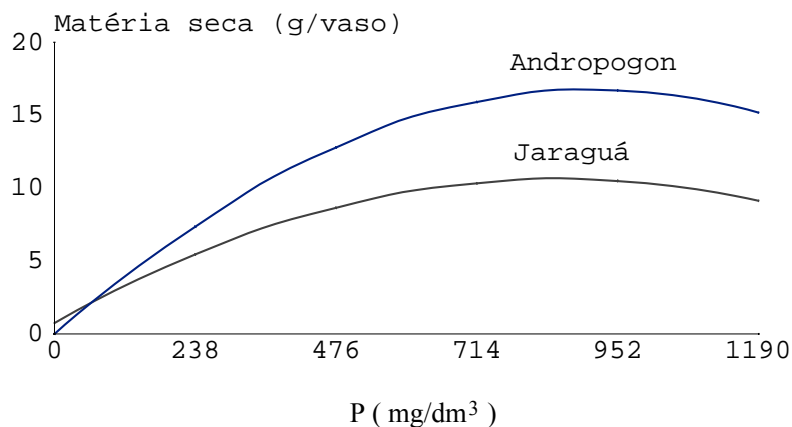
Figura 2 - Produção de matéria seca de duas espécies de gramíneas forrageiras, braquiária (*Brachiaria decumbens*) e jaraguá (*Hyparrhenia rufa*), em resposta à aplicação de cinco doses de enxofre em um Latossolo Vermelho-Escuro. FONTE: Casagrande & Souza, 1982.

Nesse caso, a braquiária mostra maior capacidade de produção em relação ao jaraguá. Percebe-se, assim, que o conceito de fertilidade deve considerar, também, a espécie a ser cultivada. Com a evolução das pesquisas na área das relações solo-planta, o conceito estático e reducionista de que a fertilidade de um solo é sua capacidade de ceder nutrientes, tem sido revisto. Espécies leguminosas em associação simbiótica com rizóbio podem apresentar maior capacidade de acidificação do solo na região da rizosfera, trazendo reflexos importantes para sua nutrição.

Por outro lado, essas respostas poderiam ser diferentes em outro solo, devido à diferentes características entre eles, mostrando que o produto final resulta da interação solo-planta (Figuras 3 e 4).

Dessa forma, conclui-se, que considerando determinado nutriente o solo pode ser fértil, porém, em relação à outro nutriente não. O mesmo se observa em relação à espécie a ser cultivada, ou ainda para diferentes variedades de uma mesma espécie,

fato que é enfatizado em diversas publicações (Russell & Russell, 1973; Epstein, 1975; Malavolta, 1980; Magnani, 1985).

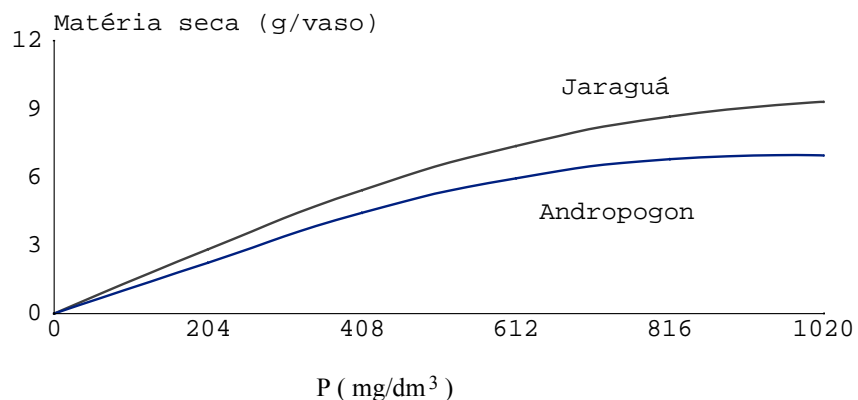


$$\text{Andropogon: } \hat{Y} = -0,4063 + 0,0375^{**}X - 0,0000205^{**}X^2 \quad R^2 = 0,916$$

$$\text{Jaraguá: } \hat{Y} = 0,7479 + 0,0230^{**}X - 0,0000134^{**}X^2 \quad R^2 = 0,924$$

Figura 3 - Produção de matéria seca da parte aérea de capim andropogon (*Andropogon gayanus*) e jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) em resposta à aplicação de diferentes doses de P em um Latossolo Vermelho-Amarelo de Minas Novas. FONTE: Fonseca, 1986.

A fertilidade não é característica estática e sim processo altamente dinâmico (Figura 5). Por isto no seu estudo é necessário definir os limites da sua interpretação e o alcance das recomendações. Esse processo é apresentado numa visão hidrodinâmica para explicar a capacidade do solo de ceder nutrientes (disponibilidade). Assim, a disponibilidade seria resultante da interrelação entre os fatores quantidade (Q), intensidade (I) e capacidade tampão (CT), como se explicará posteriormente.



Andropogon: $\hat{Y} = -0,6289 + 0,0157^{**}X - 0,0000081 \cdot X^2$ $R^2 = 0,970$

Jaraguá: $\hat{Y} = -0,4139 + 0,0175^{**}X - 0,0000078 \cdot X^2$ $R^2 = 0,989$

Figura 4 - Produção de matéria seca da parte aérea de capim andropogon e jaraguá em resposta à aplicação de diferentes doses de P em um Latossolo Vermelho-Amarelo de Sete Lagoas. FONTE: Fonseca, 1986.

O conceito de fertilidade do solo (capacidade de ceder nutrientes) poderia ficar restrito à fase sólida e líquida, e tem como limite a solução do solo perto da fase sólida, a partir de onde são efetuados os processos de transporte (difusão, fluxo de massa), interceptação radicular e absorção.

A fertilidade do solo, em sua definição, considera as interações existentes no solo (antagonismos e sinergismos), os quais, sem dúvida devem ser considerados ao estudá-la e quantificá-la.

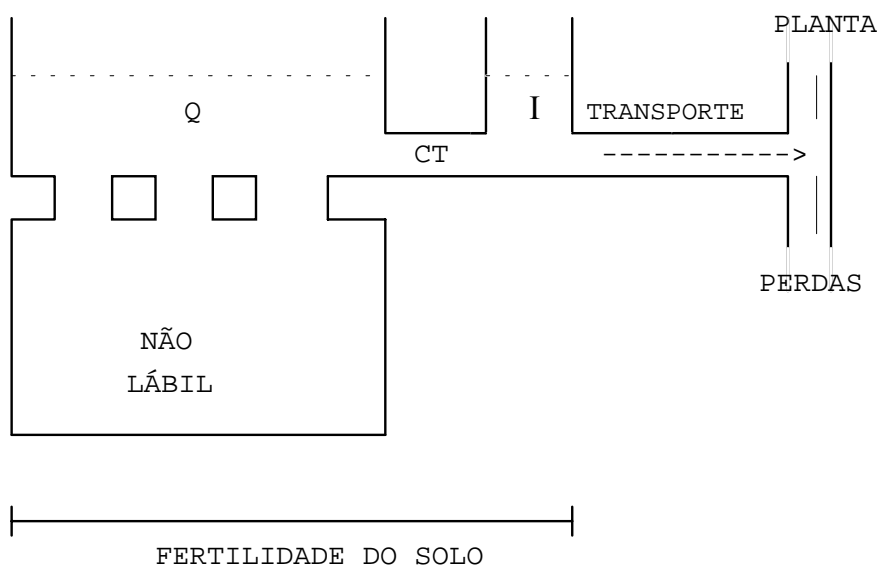


Figura 5 - Visão hidrodinâmica das interrelações entre os fatores quantidade (Q), intensidade (I) e capacidade tampão (CT), que definem a fertilidade de um solo. FONTE: Ribeiro et al., 1987.

Dada a necessidade de se avaliar a fertilidade do solo sob uma visão holística e dinâmica, didaticamente tem-se empregado os termos "Fertilidade Natural", "Fertilidade Potencial" e "Fertilidade Atual", a fim de facilitar o entendimento desse conceito (Buol et al., 1974; Lepsch, 1983).

1.3.2. Fertilidade Natural

A fertilidade natural corresponde à fertilidade do solo quando ainda não sofreu nenhum manejo, ou seja, não foi trabalhado e portanto, não sofreu recente interferência antrópica. É muito usada na avaliação e classificação de solos onde não existe atividade agrária. Dá idéia da capacidade que apresenta um solo ou unidade de classificação para ceder nutrientes; mostra as diferenças entre as unidades (Lepsch, 1983). Por exemplo, em dois solos com diferentes graus de saturação de bases, o solo distrófico ($V < 50\%$) aparentemente apresentaria menor capacidade de ceder nutrientes, comparado ao eutrófico ($V \geq 50\%$). Na verdade, estes índices pouco representam em termos da real capacidade de ceder nutrientes como P, S, Zn, Mn, já que um solo pode ser distrófico e ter uma CTC superior, com maiores teores de cátions trocáveis, do que um solo eutrófico e, portanto, ter condições de fornecer maior quantidade de nutrientes para as plantas (Quadro 2).

Quadro 2 - Características químicas de dois solos com diferentes graus de saturação de bases (V)

Solo	SB	T	V
	----- $\text{cmol}_C/\text{dm}^3$ -----		%
Eutrófico	2	3	66,7
Distrófico	7	15	46,7

$$\text{cmol}_C/\text{dm}^3 = \text{meq}/100\text{cm}^3$$

1.3.3. Fertilidade Potencial

No caso da fertilidade potencial, evidencia-se a existência de algum elemento ou característica que impede o solo de mostrar sua real capacidade de ceder nutrientes. Assim, persistindo essas condições limitantes, a capacidade de ceder elementos estará obstruída, ainda que a fertilidade potencial seja alta.

Entre as características limitantes cita-se o caso de solos ácidos, onde o teor de Al^{3+} é elevado e a disponibilidade de Ca, Mg e P é baixa ou insuficiente, o que se poderia corrigir com adição de calcário, gesso e fosfato.

Assim, também, os solos salino-sódicos apresentam conteúdos excessivos de Na^+ , o que eleva o pH e ocasiona diminuição da disponibilidade de micronutrientes, principalmente Fe, Mn, Zn e Cu.

O Quadro 3 dá uma idéia desse tipo de fertilidade, pois se observa que a incorporação de gesso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, aumentou significativamente a produção de soja e de feijão, mesmo em diferentes solos, devido ao fornecimento de Ca e S, efeito fertilizante, e a diminuição de saturação de Al no solo, efeito corretivo.

Quadro 3 - Produção de grãos de soja e de feijão pela aplicação de gesso agrícola em solos do Estado de São Paulo.

Tipo de solo	Cultura	+ Gesso *	- Gesso	Diferença
----- kg / ha-----				
- Latossolo Roxo	Soja	1.739	1.306	+ 483
- Latossolo Vermelho Amarelo (fase arenosa)	Soja	1.608	1.258	+ 350
- Latossolo Vermelho Escuro (fase arenosa)	Soja	1.616	1.130	+ 486
- Arenito de Botucatu	Soja	1.608	1.258	+ 350
- Podzólico Vermelho	Feijão	2.216	1.961	+ 255
- Podzólico Vermelho Amarelo (var. Láras)	Feijão	872	550	+ 322
- Latossolo Vermelho Escuro (fase arenosa)	Feijão	1.535	1.105	+ 430

* Em todos os ensaios foram aplicados 100 kg/ha de gesso.

FONTE: Vitti & Malavolta, 1985.

1.3.4. Fertilidade Atual

A fertilidade atual é a que apresenta o solo após receber práticas de manejo para satisfazer as necessidades das culturas; dá a idéia da fertilidade de um solo já trabalhado. Deve ser interpretada considerando-se as correções realizadas, por exemplo, calagem, adubação fosfatada, etc.

A fertilidade atual é caracterizada pela determinação das formas disponíveis dos nutrientes do solo.

1.4. Leis Gerais da Adubação

O crescimento de uma planta é função, entre outros fatores, da quantidade de elementos essenciais a ela fornecidos.

A adição de nutrientes ao solo por meio das adubações constitui, quando aplicada científica e racionalmente, prática fundamental para o êxito de qualquer exploração agrícola. A adubação tem como objetivo primordial manter ou aumentar no solo a disponibilidade dos nutrientes e o teor de matéria orgânica, já que a incorporação de elementos restitui aqueles perdidos pelo solo em processos de lixiviação, erosão, complexação, imobilização, fixação, volatilização e, de absorção pelas plantas (Russell & Russell, 1973; Tisdale & Nelson, 1975; Sanchez, 1981; Thomas & Hargrove, 1984).

Por isso, o crescimento das plantas depende, entre outros fatores, da quantidade de nutrientes adicionados ao solo.

Os princípios da adubação são provenientes de três leis fundamentais: lei da restituição, lei do mínimo e lei do máximo e de duas derivações da lei do mínimo: lei dos incrementos decrescentes e lei da interação e uma derivada da lei do máximo: lei da qualidade biológica (Voisin, 1973).

1.4.1. Lei da Restituição

A lei da restituição baseia-se na necessidade de restituir ao solo aqueles nutrientes absorvidos pelas plantas e exportados com as colheitas, ou seja, aqueles que não foram reciclados. Essa lei considera o esgotamento dos solos, decorrência de cultivos sucessivos, como uma das origens da redução da produtividade.

Esta lei foi enunciada por Voisin (1973) nos seguintes termos:

- é indispensável, para manter a fertilidade do solo, fazer a restituição, não só dos nutrientes exportados pelas colheitas, mas, também, daqueles perdidos do solo.

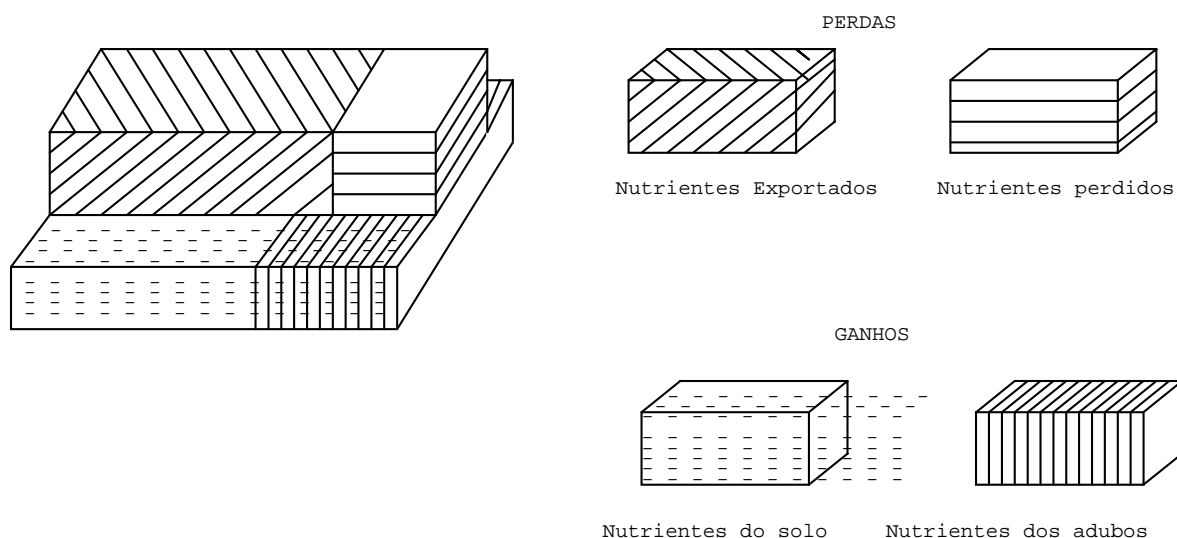


Figura 6. Representação gráfica da lei da Restituição.

Dentro de sua concepção, essa lei apresenta várias limitações à sua completa aplicabilidade, posto que:

a) Muitos solos são naturalmente pobres em um ou mais nutrientes, ou apresentam problemas de acidez ou problemas de salinidade. Portanto, o primeiro objetivo seria corrigir as deficiências ou excessos existentes.

b) Os solos estão submetidos à perda de nutrientes por lixiviação e mesmo por erosão, perdas que muitas vezes são intensificadas pela adição de corretivos e adubos; por exemplo, pelo uso de gesso, que aumenta a mobilidade de cátions em profundidade, no perfil do solo. Em geral, essas perdas são insignificantes para P, mas para N, K, S, Mg e Ca podem ser muito importantes.

1.4.2. Lei do Mínimo

Esta lei, também conhecida como lei de Liebig, foi enunciada em 1843. Relaciona o crescimento vegetal com a quantidade do elemento existente no solo. Segundo ela, o crescimento de uma planta está limitado por aquele nutriente que se encontra em menor proporção no solo, em relação à necessidade das plantas (Russell & Russell, 1973; Tisdale & Nelson, 1975; Raji, 1981).

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

Esta lei estabelece uma proporcionalidade direta entre a quantidade do fator limitante da produção, um nutriente, e a colheita, definida pela equação:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X$$

Eq. 1

onde Y corresponde a colheita obtida com a quantidade X do fator limitante da produção, b_0 corresponde a produção Y sem adição de X, e, b_1 corresponde ao coeficiente angular da reta, e mede a influência maior ou menor do nutriente aplicado.

A Figura 7, representa o aspecto quantitativo da lei que, sendo linear possui validade somente para a região "A" da curva ($N_0 - N_1$), uma vez que doses adicionais geram resposta curvilínea ($N_1 - N_2$).

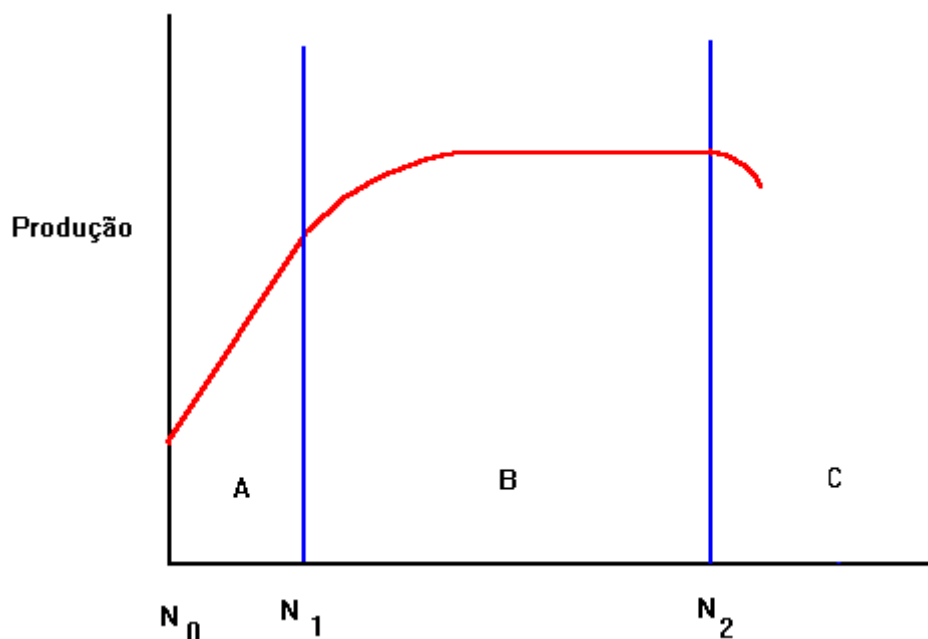


Figura 7 - Curva de resposta à adição de um nutriente. FONTE: Alvarez V. (1985).

Segundo a interpretação quantitativa da lei de Liebig, o crescimento é continuamente linear até um ponto onde se alcança um "plateau" devido à insuficiência de outro fator que se torna limitante do crescimento, e que, se suprido, provoca outro surto de crescimento, até que novo nutriente (ou fator) se torne limitante e, assim, sucessivamente (Figura 8).

Também pode considerar-se que a produtividade aumenta linearmente, com o nutriente adicionado, até que um "plateau" seja atingido, em consequência de ter outro nutriente passando a ser mais limitante ao crescimento e, portanto, o único limitante da produtividade (Figura 8). Em outras palavras, uma adubação com N e K não traria aumento algum na colheita se o elemento mais limitante no solo fosse o P. Somente após aplicação do P é que haveria possibilidade de resposta ao N ou a K.

Essa situação é bem representada por uma corrente que suporta certo peso. Se há um elo mais fraco, a resistência da corrente não será alterada pelo

reforço de outros elos. Para que a corrente suporte um peso maior deve-se, portanto, reforçar, inicialmente, aquele elo mais fraco.

Essa lei tem sido também ilustrada, tradicionalmente, por um barril, tendo algumas tábuas com diferentes alturas, sendo a tábua com a menor altura a que representa o elemento mais limitante. O aumento dessa tábua permitirá aumentar o nível de líquido no barril até o limite de outra tábua, agora a de menor altura.

Ao se verificar as limitações do aspecto quantitativo da lei do mínimo (resposta linear à aplicação de um nutriente) na representação de uma função de resposta biológica (obviamente curvilínea), sua utilização atual tem sido por meio de constatação apenas qualitativa. Dessa maneira, a presença de um nutriente em nível insuficiente no solo é responsável pela redução da eficiência e não pela eliminação completa dos efeitos de outros nutrientes.

Atualmente, a lei do mínimo se exprime, com mais freqüência, considerando seu aspecto qualitativo, da seguinte forma (Voisin, 1973):

A insuficiência de um elemento nutritivo no solo reduz a eficácia dos outros elementos e, por conseguinte, diminui o rendimento das colheitas.

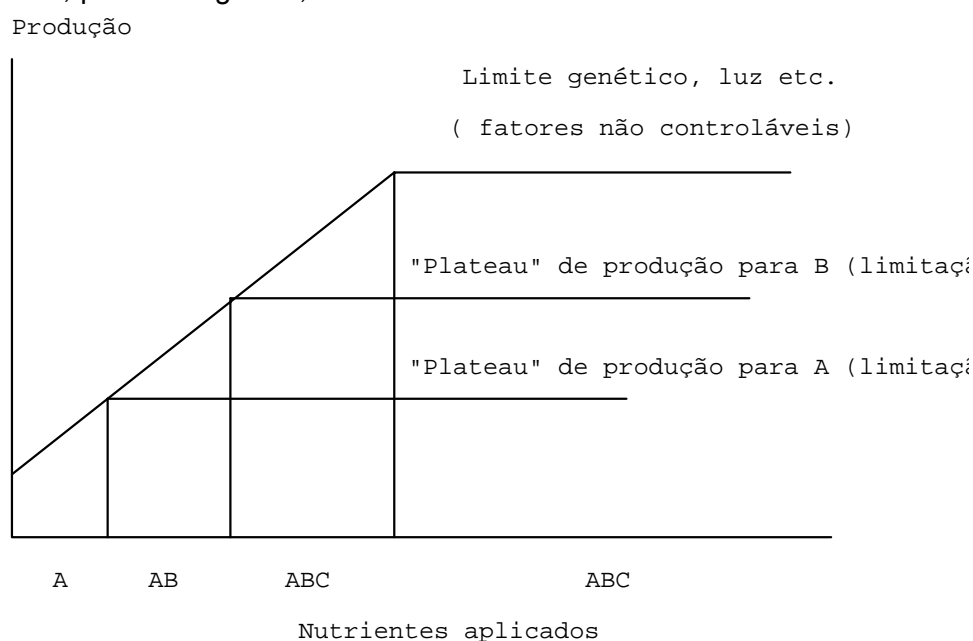


Figura 8. Resposta linear à adição de nutrientes baseada na Lei do Mínimo.

1.4.2.1. Lei de Mitscherlich, como Derivação da Lei do Mínimo

Em 1909, o alemão E. A. Mitscherlich, tomando como base uma série de ensaios, desenvolveu uma equação relacionando o crescimento de plantas ao suprimento de nutrientes (Tisdale & Nelson, 1975).

A resposta linear à aplicação de um nutriente, em nível insuficiente no solo, proposta por Liebig, é complementada pela resposta curvilínea correspondente à adição daquele nutriente, em doses adicionais, até atingir o ótimo crescimento das plantas. O modelo linear de Liebig foi substituído ou complementado por Mitscherlich, que observou que, com o aumento progressivo das doses do nutriente deficiente no solo, a produtividade aumentava rapidamente no início (tendendo a uma resposta linear) e estes aumentos tornavam-se cada vez menores até atingir um "plateau", quando não havia mais respostas a novas adições (Malavolta, 1976; Braga, 1983; Pimentel Gomes, 1985). Este tipo de resposta é expressa, matematicamente, pela diferencial:

$$\delta Y = c(A - Y) \delta X \quad \text{Eq. 2}$$

onde, Y é a produção obtida; A é a produção máxima esperada em resposta ao nutriente X colocado à disposição da planta (ou outro fator de produção, como luz, temperatura etc.); e c é uma constante de proporcionalidade ou "coeficiente de eficácia".

Esta equação mostra que o aumento de produção δY é proporcional ao crescimento das doses do nutriente δX e, ainda, à diferença entre a produção máxima possível A e a produção obtida Y. Assim, quanto mais próximo Y estiver de A, menos interessante se torna a aplicação de adubo. Se Y tende para A, δY tende para zero. Esta equação representa a primeira aproximação da função de Mitscherlich (Alvarez V., 1985).

As denominações de "lei dos excedentes menos que proporcionais" ou "lei dos incrementos decrescentes" traduzem bem a forma de equação que se representa na Figura 9.

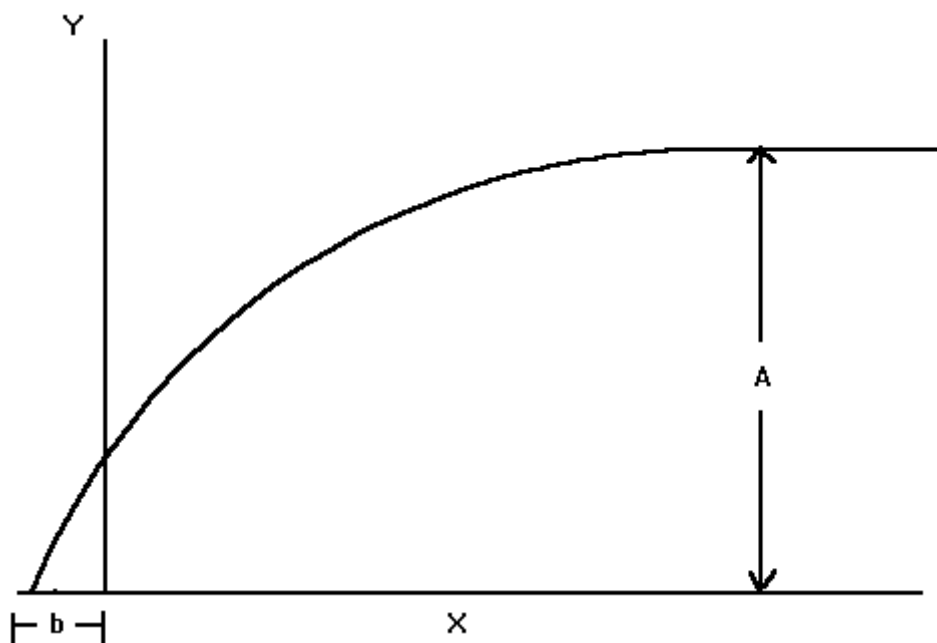


Figura 9. Representação gráfica da equação de Mitscherlich.

Esta lei se expressa da seguinte maneira:

Quando se adiciona ao solo doses crescentes de um nutriente, os incrementos de produção são cada vez menores.

A Eq. 2, na sua forma integrada é a seguinte:

$$\hat{Y}_1 = A(1 - 10^{-c(X + b)}) \quad \text{Eq.3}$$

onde: "X" da diferencial (Eq. 2) é desdobrado em (X + b), ou seja, a quantidade do nutriente aplicada como adubo (X), por exemplo, e a quantidade do mesmo nutriente já existente no solo (b). A quantidade b do nutriente no solo é responsável por alguma produção (produção da "testemunha"). Esta produção é aumentada com a aplicação do mesmo nutriente na forma de fertilizante. A produção é, então, consequência da quantidade existente no solo e da aplicada (b + X). Os valores Y, A, X e b são, frequentemente, expressos em kg/ha, enquanto c é expresso em ha/kg.

A Eq. 3 é considerada a primeira aproximação da lei de Mitscherlich, e quando linearizada, na sua forma logarítmica, é:

$$\log (A - Y) = \log A - c (X + b) \quad \text{Eq.4/}$$

O ajustamento dos dados de produção obtidos, em resposta à aplicação de três níveis de nutrientes à equação de Mitscherlich é apresentada por Pimentel Gomes (1985), e para cinco ou mais níveis, por Braga (1983) e Alvarez V. (1985).

1.4.2.2. Lei da Interação

Considerando o aspecto qualitativo da lei do mínimo, tem-se uma variante moderna que é a lei da interação, que se expressa assim (Voisin, 1973):

Cada fator de produção é tanto mais eficaz quando os outros estão mais perto do seu ótimo.

Esta lei exprime que é ilusório estudar, isoladamente, um fator de produção, e que, pelo contrário, cada fator deve ser considerado como parte de um conjunto, dentro do qual ele está relacionado com os outros por efeitos recíprocos, pois eles se interagem. A função que expressa este comportamento é a seguinte:

$$Y = f(X_i // \phi_i, X_j, X_k) + \varepsilon_{ijk} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde, a produção (Y) é função de um conjunto de fatores ou variáveis em estudo (X_i), as quais têm associadas a forma de resposta (ϕ_i); de variáveis controladas mantidas em forma constante (X_j), e de variáveis aleatórias ou não controláveis (X_k). A isto, deve-se acrescentar o erro ε_{ijk} (Alvarez V., 1985).

Muitos experimentos têm mostrado que existem interações entre os elementos e outros fatores de produção, isto é, um ou mais elementos exercem influência mútua ou recíproca. Essa influência pode ser positiva, sinérgica, como no caso de N x P; N x K; P x Ca; P x S; P x H₂O do solo; N x Irrigação; N x Controle de más ervas; ou, ao contrário ser negativa, antagônica, onde um fator ou elemento limita a ação de outro elemento: Al x P; Al x Ca; P x Zn; P x Fe; P x Cu; Ca x Zn; S x Mo; Ca x B; Zn x Fe. Estes efeitos dependem, em alto grau, das concentrações existentes, como por exemplo, das modificações provocadas na disponibilidade dos nutrientes pela aplicação de uma supercalagem (Fassbender, 1978; Malavolta, 1980; Dobb & Thompson, 1985).

Na cultura de milho, por exemplo, a produtividade de 2.000 kg/ha da testemunha sofre um incremento de 1.500 kg/ha com aplicação da "dose ótima" de N (NDO), ou um incremento de 2.500 kg/ha com o uso da "dose ótima" de P₂O₅ (PDO), e pode elevar-se a uma produção de 7.000 kg/ha com aplicação dos dois nutrientes em "doses ótimas". O efeito sobre a produtividade, no caso da aplicação dos dois

nutrientes, foi mais do que aditivo (5.000 kg/ha, em lugar de 1.500 + 2.500 kg/ha), ou seja, houve um efeito interativo (Figura 10).

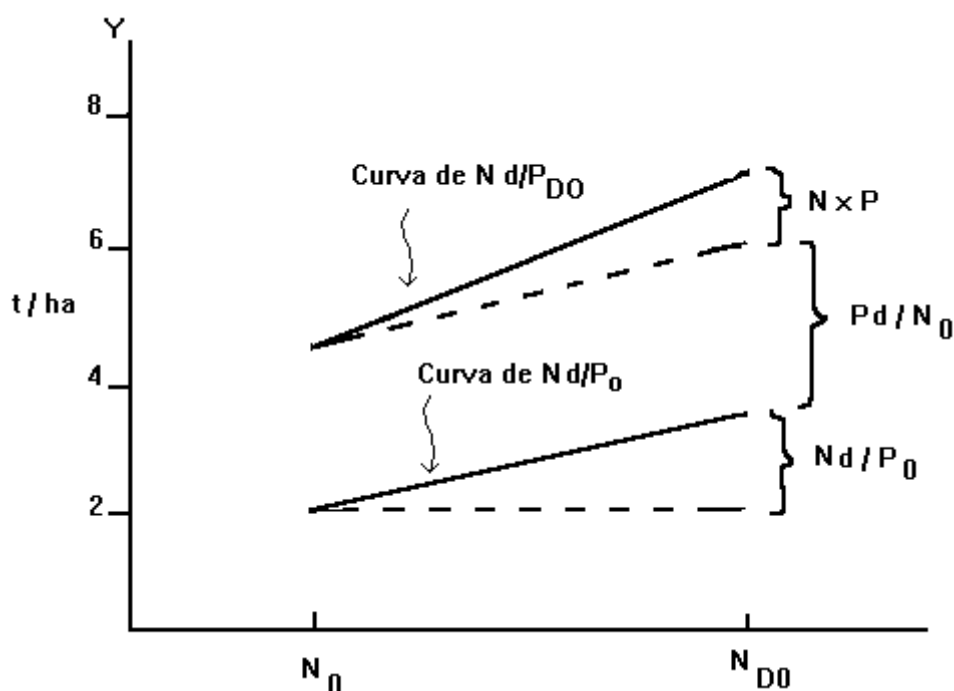


Figura 10. Efeito do N na ausência de P ($N d/P_0$), do P na ausência de N ($P d/N_0$) e da interação N, P ($N \times P$).

FONTE: Alvarez V., 1987.

Essas interações ocorrem não somente no solo, mas, também, na planta, a exemplo da presença de enxofre em quantidades adequadas na planta, favorecendo o metabolismo do nitrato (NO_3^-), e sua redução para constituir aminoácidos. Se ocorrer elevação na concentração de S, diminui a de NO_3^- e, ao contrário, ocorrerá acúmulo de NO_3^- na planta.

1.4.3. Lei do Máximo

Normalmente, ao se aumentar ainda mais as doses de um nutriente (acima de N_2 , na Figura 7), observa-se que os rendimentos começam a diminuir (região C dessa Figura). Nesse caso, é o excesso que limita ou prejudica a produção.

Foi considerando este aspecto, especialmente em relação à produção, que André Voisin (1973) enunciou a lei do máximo, nos seguintes termos:

O excesso de um nutriente no solo reduz a eficácia de outros e, por conseguinte, pode diminuir o rendimento das colheitas.

Respostas negativas por meio do decréscimo da produtividade são observadas em resultados experimentais. Tal tipo de resposta não foi previsto pela lei de Mitscherlich, na sua primeira aproximação.

Matematicamente, a resposta da planta, neste caso, pode ser bem representada pela equação de segundo grau:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X - b_2X^2 \quad \text{Eq. 6/}$$

onde: Y é a produção obtida em resposta à quantidade do nutriente X aplicado ao solo.

Tendo-se os resultados experimentais ajustados a este modelo, o cálculo da produção máxima estimada e da quantidade de nutriente X a ser aplicada para que se tenha esta produção, torna-se fácil pelo cálculo de máximos e mínimos (Alvarez V., 1985).

Como a função de Mitscherlich, na sua primeira aproximação (1909) não considera a possibilidade de diminuição da resposta, por efeito negativo (tóxico) de novas adições de um nutriente, em 1928 este autor propôs a adição de um fator de correção na sua equação (fator que considera o efeito tóxico) e se conhece como segunda aproximação, que matematicamente se expressa assim (Alvarez V., 1985; Magnani, 1985):

$$\hat{Y}_{II} = A(1 - 10^{-c(X+b)})(10^{-k(X+b)^2}) \quad \text{Eq. 7/}$$

Se considera que o fator de correção da segunda aproximação de Mitscherlich (Eq. 2.7) é o efeito tóxico (T) do nutriente, é possível estimar este efeito pela diferença entre a primeira aproximação e a segunda (Alvarez V., 1985). Assim:

$$T = \hat{Y}_I - \hat{Y}_{II}$$

$$T = A(1 - 10^{-c(X+b)})(1 - 10^{-k(X+b)^2}) \quad \text{Eq. 8/}$$

1.4.3.1. Lei da Qualidade Biológica

Considerando os efeitos negativos na alimentação animal pela produção de pastagem com teores desequilibrados de nutrientes, pela adição exagerada de certos corretivos ou adubos, Voisin (1973) propôs a "lei da qualidade biológica", a qual é tida por ele como importante, mas de difícil aplicação prática. Ele considera que a aplicação de adubos deva ter como primeiro objetivo a melhoria da qualidade do produto, a qual tem prioridade sobre a produtividade. A deficiência ou excesso de certos nutrientes nas plantas pode causar problemas à saúde daqueles que a consomem. Evidentemente, tem merecido pouca atenção por parte dos pesquisadores que têm relegado a qualidade do produto a um nível de menor ou de mínima importância. Dentre os efeitos do uso de fertilizantes sobre a qualidade das plantas utilizadas pelo homem ou pelos animais, destaca-se o exemplo da cultura do fumo, na qual a adubação potássica não deve ser realizada com cloreto de potássio, pois, o Cl^- prejudica a combustão do fumo.

1.10. Métodos e Técnicas de Avaliação da Fertilidade do solo

1.10.1. Análise de solo

1.10.1.2. Amostragem de solo

Amostragem consiste em obter uma porção (elementos ou indivíduos) representativa de uma população em estudo. **População** é qualquer conjunto de elementos ou indivíduos que tenha, entre si, uma característica em comum. As populações podem ser **homogêneas**, quando constituída de elementos ou unidades idênticas, ou **heterogênea**, quando constituída de elementos que diferem entre si.

Para populações homogêneas, a informação de apenas um elemento pode ser extrapolada para toda a população, sem a possibilidade de erros, enquanto que no caso de populações heterogêneas, tal procedimento não satisfaz. Nesse caso, quanto maior a heterogeneidade da população, maior deverá ser o número de elementos a serem amostrados para a obtenção de uma estimativa que aproxime do verdadeiro valor médio (parâmetro) para uma determinada característica da população em estudo.

Neste segundo caso encontram-se os solos, que são populações de pedons¹, que variam intensamente a curta distância, tanto em superfície como em profundidade.

A amostragem tem então como finalidade estimar os parâmetros de uma população com uma precisão que satisfaça às necessidades do uso das informações ou do estudo específico, a um custo mínimo.

¹ Pedon é o menor volume que pode ser considerado solo, caracterizado por toda classe de variabilidade de horizonte que ocorre no solo.

1.10.1.3.Objetivos da amostragem

As técnicas de amostragem de solos devem ajustar-se às necessidades dos estudos nos campos da gênese e classificação, da química, da fertilidade, da microbiologia, considerando-se os objetivos para os quais destinam os resultados das análises. Por exemplo, se serão utilizados para pesquisas ou para assistência a agricultores.

Assim, em trabalhos de gênese e classificação de solos, os pedons são caracterizados morfológica, mineralógica, física e quimicamente. Para isto, seleciona-se um perfil representativo, do qual retiram-se amostras em cada um dos seus horizontes ou camadas.

Em trabalhos de pesquisa em química e em fertilidade de solos, em alguns casos, procura-se estudar as relações entre características edáficas (por exemplo, quantidades e formas de ferro e sua influência na disponibilidade de fósforo). Nesses estudos o que interessa é ter um conjunto de amostras que se distribuam adequadamente em toda a amplitude de variação das características que se quer relacionar, sem importar se definida amostra é representativa, ou não, de certa população. Neste caso, tomam-se amostras de pedons ou conjuntos de pedons específicos.

Em outros casos as características determinadas analiticamente na amostra serão generalizadas para um determinado conjunto de pedons (unidade de amostragem ou extrato relativamente homogêneo em relação a topografia, vegetação, cor, textura e umidade) dos quais a amostra deve **representar as características médias**. Desta forma, a amostra deve ser representativa da unidade de amostragem ou extrato. Nesta situação se encontram as amostragens para a avaliação da fertilidade do solo com o propósito de prestar assistência técnica aos agricultores.

Na avaliação da fertilidade de um solo é necessário o conhecimento de níveis ótimos (níveis críticos) de nutrientes no solo para que não haja limitação da produção pela sua fertilidade. Estes níveis ótimos permitem que os nutrientes em níveis inadequados sejam corrigidos pela adubação. Torna-se, então, necessário analisar o solo a ser cultivado, o que será possível com a obtenção de uma amostra representativa do solo.

Considerando que **as análises são feitas a partir de amostra** estas **devem ser o mais representativas possíveis da população** porque **nenhum resultado é melhor que o verdadeiro resultado da amostra**, portanto, nada que seja realizado no laboratório melhora a qualidade do resultado por sobre a qualidade da amostra.

1.10.1.4.A variabilidade do solo

O solo como um corpo tridimensional apresenta suas características químicas (teor de elementos, por exemplo) e físicas (textura, por exemplo) são distribuídas de uma maneira não uniforme, tanto superficialmente como em profundidade.

Superficialmente as variações ocorrem em grandes e pequenas distancias, compreendendo macro e micro variações, respectivamente.

As macro variações caracterizam-se por mudanças morfológicas e/ou mineralógicas e/ou físicas e/ou químicas dos pedons que se manifestam como unidades superficiais que permitem subdividir uma paisagem (área) a ser amostrada, em **extratos ou unidades de amostragem** mais homogêneas possíveis (Figura 11).



Figura 11. Estratificação de uma paisagem unidades (estratos) de amostragem.

O processo de estratificação é feito considerando-se a uniformidade da vegetação, da topografia, da drenagem, da cor do solo, da textura, e independe da área (tamanho) que possa ocupar cada **estrato** ou **unidade de amostragem**. Ao se fazer a estratificação, elimina-se, em parte a macro variação superficial que há nos solos.

A **vegetação** é um dos principais fatores de estratificação, porque ao mesmo tempo em que é um fator pedogenético, permite estimar as diferenças entre solos. Para fins de amostragem de solos devem ser consideradas a vegetação passada, a atual e também as culturas a serem realizadas.

A **topografia** é um fator tão importante que poderá determinar a presença de diferentes solos, por exemplo em nível de grande grupo, além de determinar variações em fertilidade e de disponibilidade de água.

A **cor do solo** pode indicar diferenças no material parental, na quantidade e qualidade de matéria orgânica, nos teores de Mn, Fe e Al.

A **textura**, que é de difícil avaliação, deve ser considerada com muito cuidado para não agrupar unidades de solo de textura diferente. A textura, além de influenciar na variabilidade das características químicas dentro das unidades de amostragem, será considerada como um critério específico na interpretação dos resultados e na recomendação do uso de fertilizantes.

Em outro nível, as microvariações referem-se a diferenças nas características dentro das unidades de amostragem ou extratos, verificadas à pequenas distâncias (da ordem de centímetros).

A variabilidade das características químicas a curta distância dentro de uma unidade de amostragem é intensa. Esta variabilidade é inerente à gênese do solo, mas é acentuada pela decomposição localizada de resíduos orgânicos e aplicação localizada de fertilizantes. Assim, esta variabilidade é mais intensa em solos agricultados e em solos sob pastagem do que sob as vegetações naturais (mata, cerrado, campo etc). Da mesma forma ela é mais intensa em solos argilosos do que em solos arenosos e mais em solos aluviais do que em solos das encostas e do topo da paisagem. Deste modo, pode-se assumir o solo como um conjunto de pedons com baixos, médios e altos teores de determinado nutriente, distribuídos aleatoriamente. Deste complexo de pedons com fertilidade diferente, o sistema radicular das plantas integra todos os componentes e a cultura desenvolve-se de acordo com a fertilidade média do solo.

Portanto, com a amostragem de solo para avaliação da fertilidade, procura-se estimar a fertilidade média do estrato. Diante das micro variações, para obter-se esta estimativa várias amostras, **denominadas de amostras simples**, devem ser tomadas do estrato.

A intensidade da micro variação na unidade de amostragem é acentuada pelos fatores mencionados anteriormente, mas depende intrinsecamente, da característica avaliada. Em razão da escala de distância em que as micro variações ocorrem, estas

não dependem da extensão da unidade de amostragem. Os valores de coeficiente de variação, como medida da variação, para algumas características químicas de diferentes solos são apresentados no Quadro 4. Observe que em todas as situações a característica fósforo é a que apresenta maior variabilidade.

Quadro 4. Coeficientes de variações (%) para algumas características medidas em amostras de diferentes solos.

Solo	Características							Fonte ^{1/}
	P	K	Ca	Mg	Al	MO	pH	
PV - terraço (Viçosa)	142	83	17	37	-	5	1	
PV - encosta (Viçosa)	62	119	43	36	-	4	1	
LR - Cascável (PR)	101	32	89	52	40	11	7	2
LV - P. Grossa (PR)	27	29	29	44	15	14	4	2

^{1/} 1. BARRETO et al, 1974; 2. ALVAREZ & CARRARO, 1976

VAN DEN HENDE & COTTENIE (1960) encontraram para amostras compostas de cinco amostras simples coeficientes de variações de 2 a 30 % para características de solos da Bélgica, observando a mesma ordem:

$$P > Mg \cong K \cong Ca \cong > pH$$

Estes autores observaram, ainda, que os valores de uma característica variam em função da textura e do tamanho da amostra (número de amostras simples por amostra composta) (Quadro 5)

Quadro 5. Coeficiente de variação para fósforo em amostras de solo composta com diferente número de amostras simples.

Nº de amostras simples por amostra composta	Textura	
	Argilosa	Arenosa
5	58,0	17,6
10	14,2	12,3

A heterogeneidade existente no solo faz com que sejam retiradas de áreas estratificadas (unidades de amostragem) um certo número de amostras simples para formar uma amostra composta. E forma-se uma amostra composta em cada unidade de amostragem.

Em razão desta heterogeneidade surge a indagação: com qual número de amostras simples tem-se a melhor estimativa dos parâmetros que caracterizam a fertilidade da unidade amostrada.

Sobre o número de amostras simples por extrato, ALVAREZ V. & CARRARO (1976) verificaram que além de levar-se em consideração as características em estudo, deve considerar a variabilidade do solo, em função dos fatores já mencionados. **Portanto, é importante ressaltar que o número de amostras simples deve variar em função da intensidade de variação e não da área das unidades de amostragem.** Esta observação confirma a informação de VAN HENDE & COTTENIE (1960) que verificaram a necessidade de se retirar de uma unidades de amostragem o mesmo número de amostras simples, independentes da área ocupada por estas unidades, quando suas variabilidades eram semelhantes.

O número de amostras simples é determinado experimentalmente, para atingir-se uma determinada percentagem de variação em torno do resultado analítico médio verdadeiro, que corresponde ao erro de amostragem. A medida que se aumenta a tolerância deste erro reduz o número de amostras simples requeridas para se estimar uma característica, conforme ilustram os dados adaptados de BARRETO et al (1974) apresentados no Quadro 3. No entanto, conforme ilustra a Figura 2, a redução da percentagem de variação do erro a partir de um determinado número de amostras simples é muito pequena.

A variabilidade vertical do solo deve-se a presença das camadas e/ou horizontes, que geralmente apresentam transições paralelas à superfície. Estas transições muitas vezes são abruptas, razão pela qual, diferenças de poucos centímetros em profundidade, leva à amostragem de diferentes horizontes. Para evitar-se a influência da variabilidade em profundidade as amostras simples em uma unidade de amostragem devem ser coletadas à uma mesma profundidade do solo.

Resume-se que, para evitar as grandes variações da paisagem (macro variações) procede-se a sua estratificação (demarcação de unidade de amostragem ou estratos). Para evitar a intensa variação em superfície e a curta distância dentro da

unidade de amostragem, faz a coleta de um determinado número de amostras simples para constituir uma composta. E para evitar a variação em profundidade, as amostras simples devem ser coletadas a uma mesma profundidade.

Considerando que a amostra composta esta substituindo 'n' amostras simples para então obter a média aritmética para os valores das características analisadas, ressalta-se que as amostras simples devem apresentar o mesmo volume de solo.

Quadro 6. Número de amostras simples por extrato para atingir diferentes níveis de erro de amostragem (valor f).

Valores de f (%)	pH	P	K	Ca+Mg	Al
5	3	601	2226	298	204
10	1	149	557	75	51
20	1	38	139	19	13
40	1	10	35	5	4

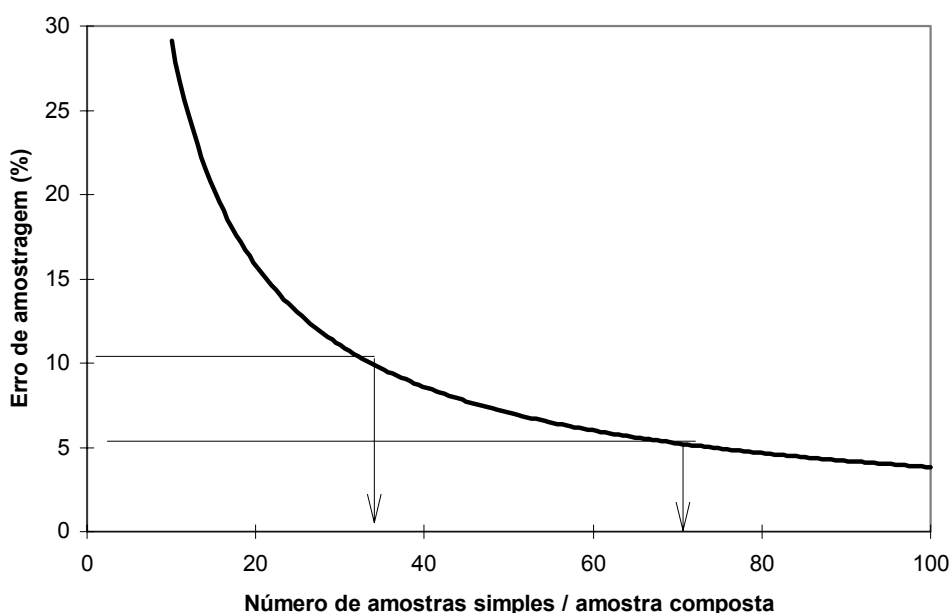


Figura 12. Variação dos erros de amostragem em função do número de amostras simples por amostra composta.

1.10.1.5. A amostragem

Diante as considerações sobre a variabilidade do solo, trataremos a seguir de aspectos específicos da amostragem para a avaliação da fertilidade do solo.

O primeiro passo no procedimento da amostragem é a estratificação da paisagem, com o propósito de reduzir a heterogeneidade do universo, controlando as macro variações. Os principais fatores a serem considerados na estratificação são a vegetação natural, o relevo, o uso passado atual e futuro e características do solo como textura e cor. Não há uma indicação de **tamanho** (m² ou ha) para cada extrato ou unidade de amostragem. Recomenda-se, no entanto, que, extratos muito grandes sejam subdivididos em substratos para facilitar a operação de amostragem. Assim, para grandes unidades de amostragens áreas entre 10 e 20 ha são consideradas as mais adequadas.

A definição do número de amostras simples por extrato é a preocupação seguinte. De modo geral, recomenda-se a coleta de 20 a 40 amostras simples por unidade experimental (ALVAREZ V. & CARRARO, 1976; BARRETO et al., 1974; JACKSON, 1970). A escolha do número exato de amostras simples dependerá das condições que determinam a intensidade de variabilidade (micro variações) do extrato. Assim dependendo das características a analisar deve se decidir por um maior número de amostras simples em áreas de pastagem e intensamente agricultadas, do que em áreas com vegetação natural ou com exploração florestal.

Outro aspecto importante é a profundidade de amostragem. Esta deve ser definida considerando a cultura que esta sendo ou vai ser realizada no terreno. Deve-se considerar a camada de solo que será explorada pela maior porção do sistema radicular da planta para a absorção de nutrientes. Um critério prático para definir a espessura da camada é saber até que profundidade será preparado o terreno para o plantio. Para cultivos de ciclo curto usualmente amostra-se a camada de 0 a 20 cm. Para pastagem recomenda-se a amostragem de 0-10 cm. Para culturas perenes, como café e essências florestais a profundidade poderá ir ate 40 ou 60 cm. Nestas situações a amostragem deve ser feita por camadas, como por exemplo: de 0 a 20 cm; 20 a 40 cm e 40 a 60 cm, constituindo-se uma amostra composta por camada.

Outro aspecto importante a ser considerado é a distribuição dos pontos de coleta das amostras simples dentro do extrato. É fundamental que os pontos de coleta estejam distribuídos por toda a área para que a amostra composta seja representativa do extrato. Recomenda-se que a escolha dos pontos seja ao acaso, percorrendo em zigue-zague toda a área da unidade de amostragem, conforme ilustra Figura 13. Apesar da localização aleatória dos pontos de amostragem devem-se evitar acidentes

estranhos na área, tais como formigueiros, cupinzeiros, locais de queimada e deposições de fezes em pastagens. Além deste aspecto os resíduos vegetais sobre o solo devem ser removidos no ponto de coleta.

Considerando que a adubação acentua as micro variações, cuidados especiais devem ser tomados na amostragem de área com cultura estabelecida, ou intensamente cultivada. Para tanto se sugere distribuir os pontos de coleta das amostras simples entre a área de influência direta do fertilizante e a área não afetada.

A retirada da amostra simples é feita utilizando-se enxada, enxada, pá ou instrumentos próprios denominados de trados ou sondas ilustrados na Figura 14. Independente ao instrumento a ser utilizando e a padronização do volume de solo coletado em cada amostra simples. Maiores cuidados são requeridos quando utiliza-se enxada, enxada ou pá. Com a utilização de sondas o volume de solo em cada amostra é mais uniforme.

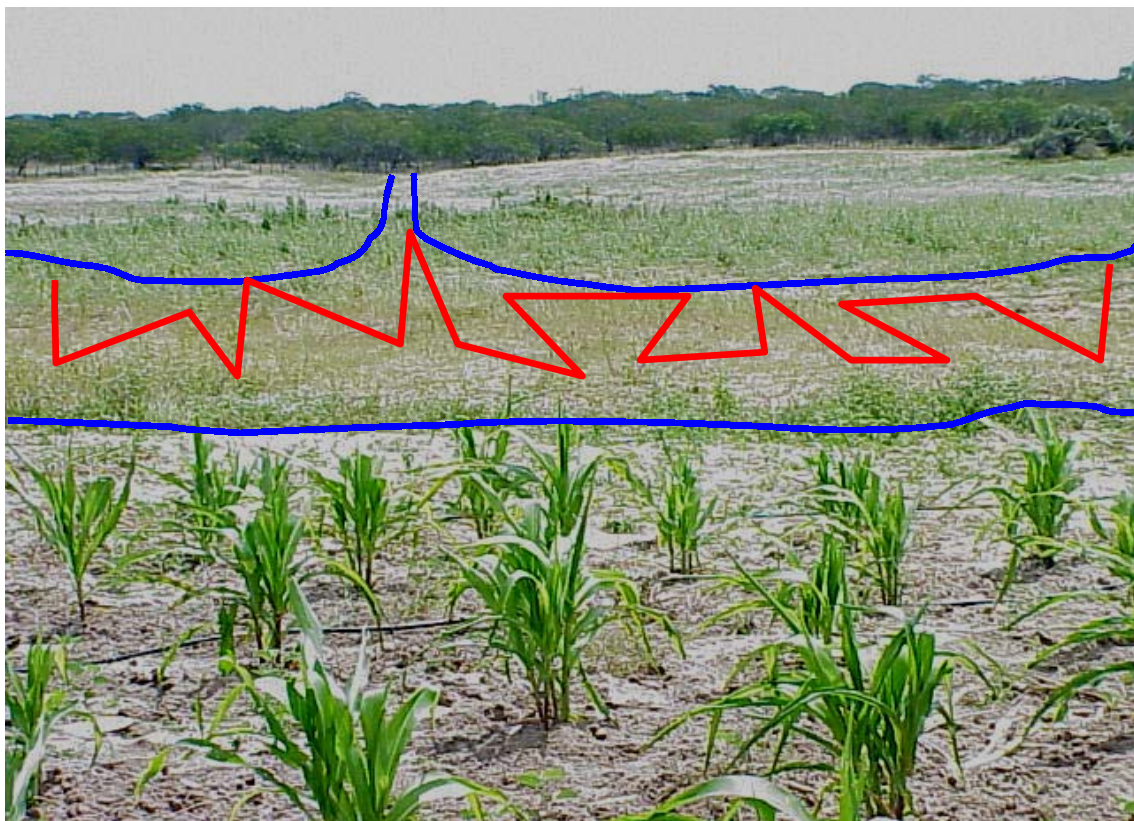


Figura 13 Esquema de distribuição aleatória dos pontos de coleta de amostras simples em uma unidade de amostragem, segundo um caminhamento em ziguezague.

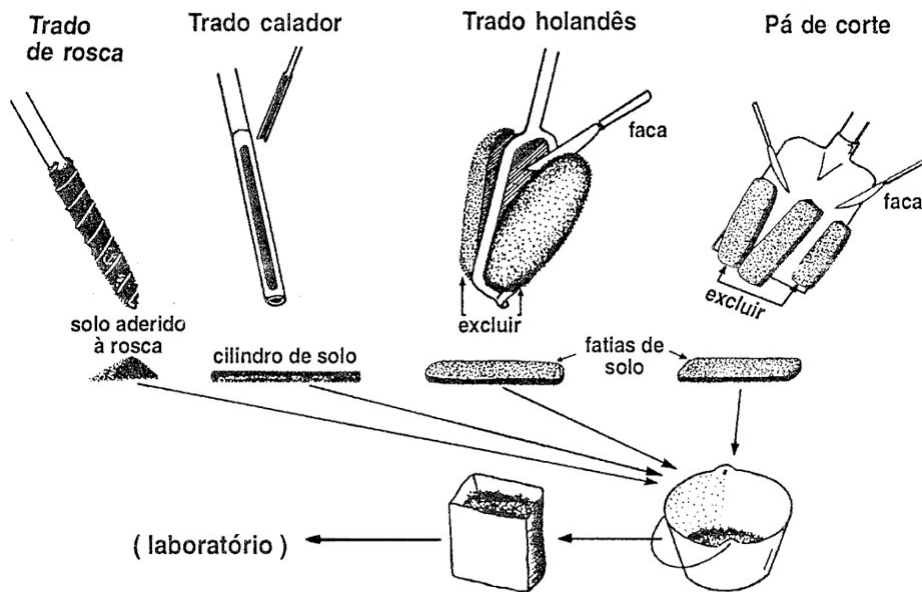


Figura 14. Equipamentos mais comuns utilizados na coleta de amostras de solo.

Durante o procedimento de amostragem as amostras simples são agrupadas em uma vasilha limpa, um balde, por exemplo. Ao final o solo deve ser totalmente destorroado e intensamente misturado para uma perfeita homogeneização. Desta retira-se aproximadamente, 500 dm^3 (0,5 L) de solo que se constitui na amostra composta, que deve ser devidamente embalada e identificada para ser enviada ao laboratório.

A amostra deve ser acompanhada por um formulário preparado pelo laboratório onde se encontram o nome e endereço do remetente, a identificação das amostras e informações complementares tais como: cultura a ser feita, cultura anterior, adubação anterior, topografia etc.

Concluindo, ressalta-se que a precisão com que uma amostra composta representa a unidade de amostragem depende da amplitude de variação da característica em estudo, do número de amostras simples coletadas e da maneira como estas são retiradas.

O resultado das análises define especificamente a característica de uma pequena alíquota de solo (a que foi usada na análise). Este valor aproxima-se da característica real do solo apenas quando:

- a amostra composta é representativa do volume total do solo da unidade de amostragem.

- nenhuma alteração (modificação ou contaminação) tenha ocorrido na amostra antes da análise.
- as alíquotas usadas na análise sejam representativas das amostras originais.
- a análise é precisa e representa realmente o desejado.

1.10.1.6. Precisão dos resultados analíticos

Finalmente, para enfatizar a importância da amostragem no resultado da análise de laboratório, devem ser consideradas os erros envolvidos no processo analítico e as suas magnitudes, considerando que este processo vai da coleta das amostras até obtenção do resultado analíticos.

Em um resultado de análise (R) existe, basicamente dois tipos de erros: o erro de amostragem (E_{am}) e o erro analítico (ϵ_{an}), portanto:

$$R = E_{am} + \epsilon_{an}$$

A magnitude dos erros de amostragem foram exemplificados pelos CV apresentados anteriormente (Quadros 5 e 6), devendo ressaltar que são da ordem das dezenas. Os erros analíticos, no entanto apresentam, normalmente, coeficientes de variação inferiores a 5 %, ou seja, muito menores do que os erros de amostragem. No Quadro 7 são apresentados alguns erros analíticos observados em análises de solos no Laboratório de Fertilidade de Solos, do Departamento de Solos, da UFV.

Quadro 7. Coeficientes de variações de algumas características analisadas em amostras de solo no Laboratório de Análise de Solos do DPS/UFV.

Característica	CV (%)	Característica	CV (%)
K	3,55	pH	1,01
P	3,59	Condut. Elétrica	2,63
Ca ²⁺	2,32	Matéria Orgânica	3,21
Mg ²⁺	4,48	N total	2,33
Al ³⁺	5,53	P-remanescente	1,74

1.11. Conceitos e unidades usuais em fertilidade do solo

1.11.1. Introdução

Em química e fertilidade do solo tem-se utilizado diferentes unidades para expressar os resultados analíticos obtidos com amostras de solo, planta, adubos e corretivos. Muitas destas unidades são conceitualmente obsoletas ou ambíguas. Além disso, a diversidade de unidades dificulta a comparação e interpretação dos resultados.

Em 1960 foi aprovado em Paris o “Système International d’Unités (SI), que tem sido regulamentado por diversas entidades internacionais, com o propósito de uniformizar as unidades adotadas nos diversos ramos da ciência.

O Brasil aderiu ao SI em 1980, o qual é, atualmente, reconhecido como oficial, sendo que a sua regulamentação compete ao Instituto Nacional de Peso e Medidas (INPM). No entanto, sua adoção pelo meio técnico-científico é ainda irregular. Na Ciência do Solo, especificamente, o SI foi oficialmente adotado a partir de 1993, por ocasião da realização do XXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, em Goiânia.

Nesta prática são apresentadas as unidades de SI de uso mais generalizado nas análises químicas de solo, material vegetal, adubos e corretivos. Como a efetiva adoção destas unidades requer um período de adaptação, paralelamente apresenta-se a sua equivalência com aquelas unidades que têm sido utilizadas tradicionalmente. São indicados também os cálculos de conversão entre as unidades.

1.11.2. Unidades do Sistema Internacional

Inicialmente será apresentada uma síntese dos conceitos e unidades do SI diretamente aplicáveis à fertilidade do solo. No SI as unidades agrupam-se em três categorias: as unidades de bases, as unidades derivadas e as unidades suplementares. Aquelas de maior interesse para a fertilidade do solo encontram-se nas duas primeiras categorias, sendo que as de uso mais freqüente são apresentadas no Quadro 8. As unidades derivadas são expressões algébricas das unidades de bases. O ajuste destas unidades às dimensões dos múltiplos e submúltiplos é feito adicionando-lhes prefixos. Os prefixos recomendados pelo SI de maior interesse para a fertilidade do solo são apresentados no Quadro 9.

Além destas unidades são aceitas algumas outras, estranhas ao SI, por serem de uso consagrado. Aquelas relacionadas com as grandezas de interesse para a fertilidade do solo estão relacionadas no Quadro 10.

Quadro 8. Unidades do SI relativas às grandezas mais utilizadas em fertilidade do solo.

Grandeza	Unidade	Símbolo
<u>Unidades de base</u>		
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Temperatura termodinâmica	Kelvin	K
Quantidade de matéria	mol	mol
<u>Unidades derivadas</u>		
Área	metro quadrado	m ²
Volume	metro cúbico	m ³
Velocidade	metro por segundo	m/s
Densidade	quilograma por metro cúbico	kg/m ³
Volume específico	metro cúbico por quilograma	m ³ /kg
Concentração em quantidade de matéria	mol por metro cúbico	mol/m ³

Quadro 9. Prefixos recomendados pelo SI de maior interesse para fertilidade do solo.

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

Quadro 10. Unidades estranhas ao SI que tem sua utilização aceita.

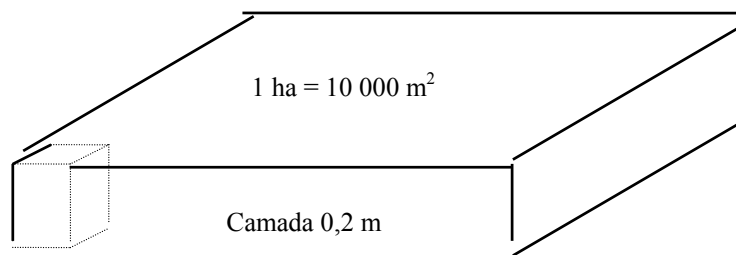
Grandeza	Unidades	Símbolo	Equivalência no SI
Tempo	minuto	min	1 min = 60 s
	hora	h	1 h = 3600 s
	dia	d	1 d = 86400 s
Volume	litro	L	1 L = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
Massa	tonelada	t	1 t = 10 ³ kg
Área	hectare	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²

De acordo com o exposto a unidade de comprimento é o metro e seus múltiplos, sendo estes de uso generalizado:

km	hm	dam	<u>m</u>	dm	cm	mm
----	----	-----	----------	----	----	----

As unidades micron (μ) e Angstrom ($\text{\AA} = 10^{-10}$ m) não são mais aceitos. Para medições nesta ordem de dimensão o SI recomenda a utilização do **micrômetro** ($1 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6}$ m) e do **nanômetro** ($1 \text{nm} = 10^{-9}$ m) sendo que $1 \text{nm} = 10 \cdot \text{\AA}$.

Entre as grandezas derivadas, a área e o volume são de uso freqüente em fertilidade do solo. A unidade de área (superfície) é o metro quadrado. No entanto, na maioria das situações relacionadas a ciências agrárias o uso do hectare ($1 \text{ha} = 10.000 \text{m}^2$) é mais conveniente. Embora hectare seja uma unidade de área (superfície), quando tratamos de aspectos relativos à fertilidade de solo, tais como determinação de doses de adubação e de corretivos, esta unidade, *intuitivamente*, refere-se a volume de solo. Isto porque, o solo é um corpo tridimensional, as plantas exploraram, de fato, um volume de solo e porque os métodos analíticos, que geram as recomendações de adubação e corretivos, são calibradas com base em um volume de solo. Usualmente as amostras são coletadas na camada de 0 a 20 cm solo. Assim, conforme ilustra a figura abaixo, o volume da amostra que é representativo do volume de um hectare corresponde a 2.000m^3 :



$$1 \text{ ha} \Rightarrow 10\,000 \text{ m}^2 \times 0,2 \text{ m}$$

$$1 \text{ ha} \Rightarrow 2\,000 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ ha} \Rightarrow 2\,000\,000 \text{ dm}^3$$

Esta é uma relação muito útil para os cálculos de adubação e corretivos.

Embora a unidade de volume seja metro cúbico, também se aceita o emprego do litro e seus múltiplos e submúltiplos, principalmente quando se trata de matéria no estado líquido:

kL	hL	daL	L	dL	cL	mL
-----------	-----------	------------	----------	-----------	-----------	-----------

Recomenda-se que o símbolo de litro seja escrito com letra maiúscula (L) assim como na composição dos múltiplos e submúltiplo. Deve-se lembrar que:

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3,$$

e considerando-se uma densidade igual $1 \text{ kg} / \text{dm}^3$, então:

$$1 \text{ L} = 1 \text{ kg}$$

Embora a unidade de massa seja o quilograma (**kg**), os seus múltiplos e submúltiplos são simbolizados pelos prefixos associados ao símbolo de grama:

kg	hg	dag	g	dg	cg	mg
-----------	-----------	------------	----------	-----------	-----------	-----------

De acordo com o SI o termo tonelada ($1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$) pode ser empregado, o que é equivalente ao megagrama ($1 \text{ Mg} = 10^6 \text{ g} = 10^3 \text{ kg}$), que é mais recomendável. No entanto, deve-se ter cautela no uso da unidade megagrama para não haver confusão do seu símbolo com o do elemento químico magnésio (Mg).

A principal alteração introduzida pelo SI na forma de apresentação dos resultados de análise de solo e de planta, deve-se a mudanças conceituais

relacionadas às grandezas quantidade de matéria (uma grandeza de base) e concentração (uma grandeza derivada).

Quando se conhece a composição química da matéria (H₂O, por exemplo) a quantidade de matéria é expressa pelo **mol**. Quando sua composição, no entanto, não é conhecida (matéria orgânica do solo, por exemplo) utiliza-se as unidades de massa para expressar a quantidade de matéria. O **mol**, é definido como:

- **a quantidade de matéria de um sistema que contem as mesmas unidades elementares, quantas forem os átomos contidos em 12 g do ¹²C.**

Assim, corresponde a um mol qualquer quantidade de matéria que contenha $6,022 \times 10^{23}$ (nº de Avogrado) entidades. Desse modo o mol é uma unidade de grandeza da quantidade de matéria do mesmo modo que o metro é uma unidade de grandeza do comprimento. Pode-se ter um mol de átomos, de moléculas, de íons, de prótons e de elétrons (portanto de carga elétrica), ou de qualquer outra entidade. Deste modo a unidade mol deve ser acompanhada da entidade considerada.

A massa de qualquer quantidade de matéria correspondente a um mol ($6,022 \times 10^{23}$ entidades) é denominada de **massa molar (M)**. Tem-se, portanto a massa molar para moléculas - **massa molecular** - (p. ex. H₂O = 18 g/mol), para elementos - **massa atômica** - (p. ex. K = 39 g/mol) e também para íons (p. ex. OH⁻ = 17 g/mol), para elétrons e outros. Deste modo, o termo peso atômico e peso molecular estão em desuso.

Como exemplo, pergunta-se:

- Qual o número de mols de átomos que se tem em 100 g de Ca? Se um mol de átomos de Ca tem 40 g / mol, então:

$$\frac{100 \text{ g de Ca}}{40 \text{ g / mol}} = 2,5 \text{ mols de átomos de Ca}$$

- Qual a massa de Ca existente em 3,5 mols do elemento?

$$3,5 \text{ mols} \cdot 40 \text{ g / mols} = 140 \text{ g de Ca}$$

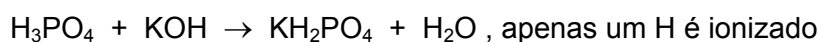
Quanto a concentração, as unidades foram divididas em duas situações: quando se conhece a composição química do composto ou seja sua massa molar e quando não se conhece.

Quando se conhece a massa molar, o termo molaridade e normalidade foram substituídos **por concentração em quantidade de matéria**, ou simplesmente

concentração, Neste caso, por definição a concentração é a relação entre quantidade de matéria (mol) do soluto e o volume da solução. A unidade de concentração é mol / m³, sendo aceito o uso dos múltiplos, tais como exemplo, mmol/dm³. O volume da solução também pode ser expresso em L, assim, se aceita: mol / L; μmol / mL; etc. Ressalta-se que a denominação de concentração molar deve ser evitada por causa de ambigüidade com o conceito de massa molar e a denominação molaridade (M = mol / L). Assim uma solução de CaCl₂ 0,01 M (molar) é corretamente especificada como 0,01 mol / L ou 10 mmol / L..

Diante das definições das grandezas quantidade de matéria e concentração os conceitos de equivalente-grama, de normal e de normalidade (N = equivalente-grama por litro) não são mais aceitos.

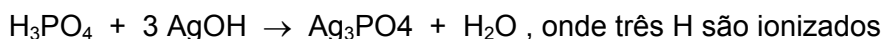
A restrição ao uso de normalidade para expressar concentração deve-se ao fato do equivalente de uma substância variar de acordo com a reação em que ela participa. Tomando por exemplo o ácido fosfórico (H₃PO₄). O equivalente-grama de um ácido é a razão entre a sua massa molar e o número de hidrogênios ionizáveis que possui. Assim, na reação



portanto, o equivalente-grama será

$$\text{Eq H}_3\text{PO}_4 = \frac{\text{massa molar}}{\text{H ionizado}} = \frac{98 \text{ g}}{1} = 98 \text{ g}$$

Já na reação:



o equivalente-grama será

$$\text{Eq H}_3\text{PO}_4 = \frac{\text{massa molar}}{\text{H ionizado}} = \frac{98 \text{ g}}{3} = 32,7 \text{ g}$$

Deste modo soluções H₃PO₄ 1N nas duas reações tem suas concentrações expressas em:

98 g/L ou 1 mol/L na primeira solução, e

32,7 g/L ou 0,33 mol/L na segunda solução.

Assim, para que a normalidade seja utilizada sem equívocos seria preciso especificar a reação e o fator de equivalência.

Também encontra-se dificuldade em estabelecer o equivalente de elementos químicos que apresentam diferentes estados de oxidação.

Ainda com respeito as unidades de concentração, não é mais recomendável o uso da percentagem (%), assim como, de parte por milhão (ppm) ou parte por bilhão (ppb). Estas unidades geram dificuldade porque podem expressar relações de massa/massa, massa/volume, volume/volume ou volume/massa e sua utilização requer esta especificação.

Em lugar de percentagem recomenda-se a utilização de unidades que mostrem explicitamente a relação entre as grandezas envolvidas, como g/kg, mg/g e $\mu\text{g/g}$ (relação de massa/massa) ou g/L (relação de massa/volume). Como veremos a seguir, uma unidade conveniente para expressar percentagem é dag / kg ou dag / dm^3 considerando que, esta relação preserva o valor numérico da unidade.

Se aceita, no entanto, o uso de percentagem para comparações fracionais bem definidas, isto é, quando se determina proporções, como nos casos de textura ou da saturação de bases.

Para a ordem de grandeza de ppm devem ser utilizadas as unidades mg / kg ou $\mu\text{g} / \text{g}$ (para relações massa / massa) e mg / L, $\mu\text{g} / \text{mL}$, mg / dm^3 (para relações massa / volume).

Quando não se conhece a massa molar a concentração em massa expressa a quantidade de massa por unidade de volume e a unidade é kg/m^3 . Aceitam-se os múltiplos, sendo que para a unidade de volume também pode ser utilizado o L.

Ao final destas considerações deve-se ressaltar que em geral as medidas são caracterizadas por três dimensões:

[valor numérico] [unidade] [fração ou forma química medida],

sendo que, não se aceita a forma química separando-as nem valores numéricos na unidade. Assim, 500 mg de P / kg é corretamente expresso como 500 mg / kg de P.

1.11.3. Análise de solo

O material de solo utilizado para análises químicas é, em geral, a terra fina seca ao ar (**TFSA**), que é por definição operacional **o material de solo seco ao ar, à sombra e passado por peneira com malha de 2 mm**. As análises são processadas a partir de um determinado peso ou volume deste material. Nos laboratórios de rotina, onde são realizadas análises para fins de avaliação da fertilidade a TFSA é medida em volume. Em geral utiliza-se para a maioria das determinações uma alíquota de 10 cm^3 ($0,01 \text{ dm}^3$). Na análise de solo são feitas determinações dos elementos em três formas: totais, disponíveis e trocáveis.

1.11.3.1. Formas totais.

Corresponde à determinação dos teores totais dos elementos químicos numa alíquota de solo. Como exemplo, são determinados os teores totais de P, Fe, Al, Si, Ca e Mg, sendo seus valores expressos na forma de óxidos P_2O_5 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Si_2O_4 , CaO e MgO , respectivamente. Estas análises são utilizadas com maior frequência para caracterizar unidades de solo para fins de classificação. Para a avaliação da fertilidade as análises de totais mais frequentes são para matéria orgânica (MO), N e S, sendo os teores destes dois elementos expressos por suas formas elementares.

De acordo com o SI a unidade para expressar os teores totais é **g/dm³**, quando a alíquota de solo analisada é medida ou **g/kg**, quando é pesada. A percentagem (%) é a unidade que tem sido utilizada tradicionalmente para teores totais, no entanto esta não é aceita pelo SI. Conforme demonstrado a seguir, um valor percentual expresso como unidades do SI (g/kg), tem seu valor numérico multiplicado por 10.

$$\% = \frac{g}{100g} = \frac{10 g}{1000g} = 10 \frac{g}{kg}$$

ou

$$\% = \frac{g}{100 \text{ cm}^3} = \frac{g}{0,1 \text{ dm}^3} = 10 \frac{g}{\text{dm}^3}$$

Uma alternativa para adotar uma unidade reconhecida pelo SI, sem alterar o valor numérico é expressar os teores totais em termos de dag/kg; dag/dm³ ou ainda dag/L para soluções como se demonstra a seguir.

$$\% = \frac{10 g}{kg} = \frac{1 \text{ dag}}{kg}$$

Ressalta-se que a percentagem pode ser utilizada quando se trata de uma composição fracional (proporção). Assim, utiliza-se percentagem para expressar a saturação de bases, saturação de alumínio e a constituição textural do solo, como será visto ao longo da disciplina.

1.11.3.2. Formas disponíveis

As formas disponíveis dos nutrientes no solo são obtidas por meio de extratores químicos e correspondem àquelas formas potencialmente absorvíveis pela plantas. Este conceito é fundamental para avaliar a fertilidade do solo e será amplamente estudado nesta disciplina.

Nas análises químicas para avaliação da fertilidade, atualmente são determinados os teores disponíveis de P e K. A unidade aceita pelo SI para expressar estes teores são: **mg/kg**, **μg/g** quando a amostra é medida em peso de solo, ou **mg/dm³**, **μg/cm³** quando a amostra é medida em volume de solo. Observe que estas unidades guardam uma relação de 1/10⁶, portanto elas substituem diretamente a unidade **ppm** (parte por milhão) que tem sido tradicionalmente utilizada para expressar os teores disponíveis, mas não é aceita pelo SI. Assim, por exemplo um teor disponível de 5 ppm de P (peso/volume) corresponde a 5 mg/dm³ de P.

Quando uma das unidades do SI que mantêm a relação de um para um milhão é multiplicada por dois tem se o teor expresso em kg/ha, como se demonstra a seguir:

$$\frac{\text{mg}}{\text{kg}} = \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ kg}} \times 2 = \frac{2 \text{ kg}}{2 \times 10^6 \text{ kg}} = \frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ ha}}$$

ou

$$\frac{\text{mg}}{\text{kg}} = \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ dm}^3} \times 2 = \frac{2 \text{ kg}}{2 \times 10^6 \text{ dm}^3} = \frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ ha}}$$

1.11.3.3. Formas trocáveis

Compreende aquelas formas obtidas por uma reação de troca entre constituintes de uma solução extratora e cátions retidos no complexo sortivo do solo. Nas análises químicas para avaliação de fertilidade determinam-se os teores trocáveis dos cátions Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ (em situações específicas), H⁺ e a capacidade de troca catiônica (CTC), como expressão da quantidade total de cátions adsorvidos ao complexo sortivo do solo.

Devido ao fato da reação de troca ser estequiométrica, tradicionalmente os teores trocáveis, assim como a CTC do solo, têm sido expressa em termos de equivalente-grama e a unidade normalmente utilizada tem sido meq (milequivalente) por 100 cm³ ou 100 g de solo. As restrições impostas pelo SI ao uso do conceito de equivalente inviabilizou o uso destas unidades. No entanto, devido ao conceito de **mol** possibilitar expressar a quantidade de matéria em termos de carga negativa (elétrons), os teores trocáveis, segundo o SI, devem ser expressos como mol_c (mol de carga) por kg ou dm³ de solo. Tomando-se os cátions Ca²⁺, K⁺ e Al³⁺ demonstra-se no quadro abaixo que os conceitos de equivalente e mol são diferentes, portanto o de equivalente e mol de carga são iguais:

Elemento	mol	mol de carga	M	Valência funcional	Peso equivalente	Nº Eq-grama
Ca ²⁺	1	2	40	2	20	2
K ⁺	1	1	39	1	39	1
Al ³⁺	1	3	27	3	9	3
N-NO ₃ ⁻ ou N-NH ₄ ⁺	1	1	14	1	14	1

o que pode ser demonstrado a partir do Ca:

$$\text{Eq Ca} = \frac{40}{2} = 20$$

$$\text{Eq em 1 mol de Ca} = \frac{40}{20} = 2$$

Considerando a ordem de grandeza dos valores dos teores trocáveis as unidades utilizadas segundo o SI, são:

cmol_c / kg ou cmol_c / dm³	centimol de carga por kg ou por decímetro cúbico de solo
mmol_c / kg ou mmol_c / dm³	milimol de carga por kg ou por decímetro cúbico de solo

Quando se utiliza a unidade mmol_c o valor em equivalente miligrama (meq), tradicionalmente utilizado fica multiplicado por 10, enquanto que se utilizando cmol_c este valor não se altera. Estas relações podem ser facilmente demonstradas:

se: Eq-grama = mol_c, então meq = mmol_c

$$\frac{1 \text{ meq}}{100 \text{ g}} (\text{unidade tradicional}) = \frac{1 \text{ mmol}_c}{100 \text{ g}} = \frac{10 \text{ mmol}_c}{1000 \text{ g}} = \frac{10 \text{ mmol}_c}{\text{kg}} = \frac{1 \text{ cmol}_c}{\text{kg}}$$

1.11.4. Análise de tecido vegetal

Para a análise de tecido vegetal utiliza-se a matéria seca (MS), que é definida como o tecido vegetal seco a 70 °C, até peso constante em estufa com circulação

forçada de ar e finamente moído. Em geral recomenda-se que a MS seja triturada em partículas menores que um milímetro.

As amostras são analisadas a partir de um determinado peso de MS, usualmente 200 a 500 mg. Em laboratórios de rotina determina-se, via de regra, os teores dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e dos micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn).

Como a alíquota de MS é pesada, os resultados são expressos em relação a unidade de massa. De acordo com o SI, os teores dos macronutrientes devem ser expressos em **g/kg** de MS. Como estes teores eram tradicionalmente apresentados em percentagem (%), para não haver alteração na ordem do valor numérico, na escala utilizada, recomenda-se a utilização da unidade **dag/kg**, conforme demonstrado anteriormente.

Os teores dos micronutrientes devem ser expressos em mg / kg, o que preserva a relação de $1 : 10^6$ que corresponde a unidade ppm (parte por milhão), que tem sido utilizada tradicionalmente.

1.11.5. Análise de fertilizantes e corretivos

Embora usualmente, análises de fertilizantes e corretivos não são processadas em laboratórios de rotina para solo e planta, trataremos das unidades adotadas para apresentar os teores de nutrientes nestes materiais.

Os teores de nitrogênio, enxofre e micronutrientes em fertilizantes, corretivos e em resíduos em geral, são expressos em percentagem (%) das formas elementares (N, S, B, Cu etc.) Enquanto isto, os teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio, são expressos em percentagem dos óxidos P_2O_5 , K_2O , CaO e MgO , respectivamente. A utilização destas formas deve-se ao fato de que no início da química agrícola as análises eram feitas por calcinação e dosavam-se os constituintes formados pelos óxidos.

Embora seja recomendado, a adoção das formas elementares para expressar os teores dos nutrientes nos fertilizantes e corretivos, encontra resistência na tradição e na própria legislação brasileira que se fundamenta no uso das formas dos óxidos expressos em percentagem. A adoção das formas elementares deve ser processada gradualmente pois ocorrem grandes mudanças em valores numéricos de teores já consagrados comercialmente. O superfosfato simples por exemplo, que apresenta 20 % de P_2O_5 , corresponde a 87 g/kg de P ou 8,7 dag/kg de P (8,7 % de P).

1.11.6. Conversões entre unidades e entre formas químicas

Algumas conversões entre unidades e formas químicas são freqüentes em um laboratório de análises químicas de solo e planta e na área de fertilidade do solo em geral. Trataremos a seguir de alguns exemplos.

As conversões entre formas químicas são freqüentes. Estas podem ser feitas considerando as massas molares ou os pesos equivalentes. Como o conceito de equivalente não é aceito pelo SI os exemplos apresentados serão com base nas massas molares.

1. Converter N para NO_3^- e vice-versa.

1 mol de N	→	1 mol de NO_3^-
14		62
Y	↔	X

$$X = Y \cdot \frac{62}{14} \quad X = Y \cdot 4,43 \text{ g}$$

$$Y = X \cdot \frac{14}{62} \quad Y = X \cdot 0,23 \text{ g}$$

2. Converter P em P_2O_5 e vice-versa.

2 mols de P	→	1 mol de P_2O_5
62		142
Y	↔	X

$$Y = X \cdot \frac{62}{142} \quad Y = X \cdot 0,437 \text{ g}$$

$$X = Y \cdot \frac{142}{62} \quad X = Y \cdot 2,29 \text{ g}$$

3. Converter Ca em CaCO_3 e vice-versa

1 mol de Ca	→	1 mol de CaCO_3
40		100
Y	↔	X

$$X = Y \cdot \frac{100}{40} \quad X = Y \cdot 2,5g$$

$$Y = X \cdot \frac{40}{100} \quad Y = X \cdot 0,40g$$

4. Converter K em K₂O e vice-versa.

2 mols de K	→	1 mol de K ₂ O
78		94
Y	↔	X

$$Y = X \cdot \frac{78}{94} \quad Y = X \cdot 0,83g$$

$$X = Y \cdot \frac{94}{78} \quad X = Y \cdot 1,21g$$

A conversão entre outras formas químicas, como de Fe para Fe₂O₃ ou Al para Al₂O₃, seguem o mesmo procedimento.

Tanto durante os procedimentos de análises químicas de solo e planta, quanto na fase de interpretação dos resultados são requeridas conversões entre unidades. Além das conversões entre unidades do SI, serão exemplificadas conversões entre algumas unidades tradicionalmente utilizadas, e que eventualmente aparecem no dia-a-dia do laboratório e na literatura.

1. O teor de N total de um solo está expresso como 0,3 %. Qual é a unidade correspondente no SI e qual o valor em **mg / kg**.

Conforme demonstrado anteriormente:

$$\% = \text{dag} / \text{kg}, \text{ logo}$$

$$0,3 \% = 0,3 \text{ dag} / \text{kg}$$

transformando-se **dag** em **mg** tem-se:

$$0,3 \text{ dag} / \text{kg} = 3.000 \text{ mg} / \text{kg de N}$$

2. Com freqüência encontram-se teores de K disponível expresso em ppm. Assim, expresse o teor de 117 ppm (peso / volume) de K em unidade equivalente do SI e também em termos de cmol_c / dm³.

$$117 \text{ ppm (peso / volume)} = 117 \text{ mg} / \text{dm}^3$$

$$1 \text{ mol K} = 39\text{g}$$

$$1 \text{ mmol K} = 39\text{mg}$$

$$117 \text{ mg} / \text{dm}^3 = \frac{117}{39} = 3 \text{ mmol} / \text{dm}^3 \text{ de K}$$

$$1 \text{ mmol de K} = 1 \text{ mmol}_c, \text{ assim,}$$

$$3 \text{ mmol} / \text{dm}^3 \text{ de K} = 3 \text{ mmol}_c / \text{dm}^3$$

transformando mili para centi, tem-se:

$$3 \text{ mmol}_c / \text{dm}^3 = 0,3 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$$

3. Você encontra em um artigo científico antigo o teor de P disponível expresso em uma forma pouco usual: 2,37 mg / 100g de P_2O_5 . Qual seria este teor expresso em uma unidade aceita pelo SI, para esta fração de P do solo.

O primeiro passo pode ser a conversão da forma química P_2O_5 para P, o que pode ser feito com base na relação entre as massas molares, conforme demonstrado anteriormente:

2 mols de P	→	1 mol de P_2O_5
62		142
Y	↔	X

$$Y = 2,37 \times \frac{62}{142} \quad Y = 2,37 \times 0,437 \text{ mg}$$

$$Y = 1,0348 \text{ mg} / 100 \text{ g de P}$$

A unidade recomendada pelo SI é mg / kg, assim:

$$\frac{1,0348 \text{ mg}}{100 \text{ g}} = \frac{1,0348 \text{ mg}}{0,1 \text{ kg}} = \frac{10,348 \text{ mg}}{\text{kg}}$$

ou seja:

$$2,37 \text{ mg} / 100\text{g de } \text{P}_2\text{O}_5 \text{ equivale a } 10,348 \text{ mg} / \text{kg de P}$$

4. Aplicaram-se 110 kg de K_2O em um hectare, sendo o fertilizante incorporado uniformemente numa camada de 0,20 m. Que concentração de K espera-se obter no

solo, quer em termos de massa do elemento como em quantidade de matéria em termos de carga.

Com base na relação das massas molares converte-se K_2O em K:

2 mols de K	→	1 mol de K_2O
78kg		94kg
Y	↔	X

$$Y = X \frac{78}{94} \quad Y = 110 \times 0,83$$

$$Y = 91,3 \text{ kg / ha de K}$$

Assumindo-se um hectare como o volume de $2 \cdot 10^6 \text{ dm}^3$, tem-se:

$$\frac{91,3 \text{ kg}}{\text{ha}} = \frac{91.300.000 \text{ mg}}{2.000.000 \text{ dm}^3} = 45,65 \frac{\text{mg}}{\text{dm}^3} \text{ de K}$$

Um mol de K (39) tem um mol de cargas, portanto:

$$\frac{45,65 \text{ mg de K}}{39 \text{ (massa molar K)}} = 1,17 \text{ mmol}_c = 0,117 \text{ cmol}_c$$

Assim:

$$110 \text{ kg / ha de } K_2O = 45,65 \text{ mg / dm}^3 \text{ de K} = 0,117 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3 \text{ de K}$$

Estes exemplos mostram algumas possibilidades de conversões e transformações usuais em fertilidade do solo.

1.11.7. Análise crítica e interpretação dos resultados de análise de solo

A análise química de solo e de planta, assim como a interpretação de sintomas visuais de deficiência nutricionais nas plantas, são os principais meios empregados na avaliação da fertilidade do solo. No entanto a análise química de solo é de uso mais difundido devido, principalmente, ao seu caráter preditivo, ou seja, com base nos resultados projeta-se as condições de crescimento que as culturas encontraram.

Propõe-se aqui, rever os resultados apresentados em uma análise de solo, demonstrar, de modo simplificado, porque a análise de solo constituí-se em um instrumento de avaliação da fertilidade e abordar a confiabilidade dos resultados apresentados na análise.

1.11.7.1.Resultados apresentados

A análise química de solo para fins de avaliação da fertilidade do solo é realizada em laboratórios de análise de rotina. O Quadro 11 apresenta, como exemplo, a forma de apresentação dos resultados da análise de rotina realizadas por um Laboratório de Análises de Solo. As análises de rotina de solo apresentam, em geral, resultados indicadores de estresse ou de impedimentos químicos ao desenvolvimento do sistema radicular e da disponibilidade de nutrientes, além de indicadores complementares para a avaliação da fertilidade.

Os resultados de pH, alumínio trocável (Al^{3+}), saturação por alumínio (valor “m”), sódio trocável (Na^+), índice de saturação por sódio, são características do solo tipicamente indicadores de condições de estresse ou de impedimento químico. Os resultados de cálcio e magnésio trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+}) de amostras coletadas em camadas de solo subsuperficiais, também são indicadores de impedimentos químicos. Esses resultados são utilizados principalmente para determinar doses de corretivos.

Os teores de P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+} e micronutrientes obtidos por soluções extratoras, são indicadores de disponibilidade destes. Tais resultados são empregados na definição de doses de adubação.

Os resultados de H+Al (acidez potencial), matéria orgânica, soma de bases (SB), saturação por bases (valor V), capacidade de troca catiônica total (T), e efetiva (t), e fósforo remanescente (P-rem) dão informações complementares para a interpretação da análise. A análise de P-rem está sendo adotada em Minas Gerais como critério adicional, indicador do fator capacidade tampão, enquanto que em outras regiões do Brasil emprega-se a análise textural do solo.

Os resultados apresentados, não são suficientes, *per si*, para avaliar a fidelidade da análise do solo. No entanto, a observação de alguns detalhes pode indicar falhas nos procedimentos.

A detecção de elevados teores de Al^{3+} , por exemplo, em solo com pH igual ou superior a 5,5 pode ser indicativo de falha no procedimento analítico, considerando que sob estas condições de acidez ativa o Al^{3+} seria precipitado. No entanto, teores da ordem de 0,1 a 0,2 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de Al^{3+} , são possíveis devido à sensibilidade do procedimento titulométrico envolvido na dosagem do Al^{3+} e por presença de H trocável em solos ricos em matéria orgânica.

Teores elevados de H+Al em solo com baixo teor de matéria orgânica, ou o inverso, também podem ser indicativo de algum problema analítico considerando que estas características são diretamente relacionadas.

A interpretação dos resultados de uma análise química requer domínio sobre as unidades empregadas. Equívocos neste sentido podem conduzir a erros grosseiros na interpretação e recomendação de adubação e corretivos. O equívoco entre $\text{mmol}_e/\text{dm}^3$ e $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$, empregados para expressar os teores de formas trocáveis, resulta, por exemplo, em erros grosseiros no cálculo da necessidade de calagem pelo método da neutralização do Al^{3+} e elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} (método de Minas Gerais) e n de saturação por bases (método de São Paulo).

Quadro 11. Exemplo de boletim de resultados de análise de solo emitido por um laboratório de análises de rotina.

Laboratório de fertilidade do Solo				
Cliente:				
Data de entrada:		Data de emissão:		
No. Protocolo:				
características	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
mo(dag/kg) ⁶				
pH (água) ¹				
P (mg/dm ³) ²				
K (cmol _c /dm ³) ²				
Ca (cmol _c /dm ³) ³				
Mg (cmol _c /dm ³) ³				
Na (cmol _c /dm ³) ²				
Al (cmol _c /dm ³) ³				
Al+H (cmol _c /dm ³) ⁴				
SB (cmol _c /dm ³)				
CTC (cmol _c /dm ³)				
V (%)				
Cu (mg/dm ³) ²				
Zn (mg/dm ³) ²				
Fé (mg/dm ³) ²				
Mn (mg/dm ³) ²				
B (mg/dm ³) ⁵				

¹ pH em H_2O , relação 1:2,5, TFSA: H_2O . ²Método Mehlich-1. ³ KCl 1 mol/L ⁴ acetato de cálcio a pH 7,0 ⁵ Método água quente. ⁶ Método Walkley & Black; M.O. = 1,724 (C.O.)

1.11.7.2. A análise de solo como instrumento de avaliação da fertilidade

Para que a análise de solo constitua-se em um instrumento de avaliação da fertilidade, duas etapas de estudos são necessárias. Embora sejam etapas desenvolvidas por pesquisadores, é importante que o profissional de nível superior habilitado a interpretar análises de solos (Eng. Agrônomo, Eng. Florestal e Zootecnista) conheçam seus fundamentos básicos. Tais etapas correspondem a correlação e a calibração de um método analítico.

Correlação:

Nesta etapa são desenvolvidos estudos para selecionar o método adequado para dosar no solo a forma química de determinado nutriente ou elemento químico. É importante ressaltar que se define como método de análise a solução extratora e todos os procedimentos operacionais necessários tais como: relação solo:solução extratora, tempo de contato, técnica de dosagem do elemento, etc. Além disso, inclui-se também padronização da amostragem e preparo da amostra de solo.

O fundamento desta etapa de correlação é facilmente compreendido, quando se busca um extrator para medir formas disponíveis dos elementos (P, K, Ca, Mg, micronutrientes, por exemplo). As quantidades dos nutrientes extraídas por um método serão indicadoras de disponibilidade se correlacionarem com as quantidades do elemento absorvidas e acumuladas pela planta. Observe que este é o conceito operacional para disponibilidade de um nutriente. Vale a pena lembrar que sob o enfoque realístico, a quantidade de nutriente disponível é aquela que pode ser absorvida pela cultura durante o seu ciclo.

Os métodos empregados atualmente, como o da extração pelo Mehlich-1 para P, K, Fe, Zn, Mn e Cu e pelo KCl 1 mol/L para Ca e Mg, por exemplo, foram selecionados após estudos de correlação.

Calibração:

A certeza de que um método de análise determina os teores disponíveis de um nutriente não é, por si, suficiente para a avaliação da fertilidade do solo. Para tanto, é necessário dispor de valores referências de disponibilidade dos nutrientes, que são denominados, comumente de níveis críticos e classes de fertilidade. Assim, em seqüência a etapa de correlação, realiza-se a calibração do método, que tem por objetivo estabelecer os níveis críticos, as classes de fertilidade e, ainda, as doses recomendáveis dos nutrientes a serem adicionadas ao solo.

Para efetuar-se a calibração de um método é necessário avaliar a sua capacidade de recuperação. Isto significa medir quanto do nutriente adicionado ao solo ele é capaz

de extrair ou recuperar. Esta informação se obtém por meio de regressão (curva de recuperação) que relaciona os teores do nutriente recuperado pelo método de extração (quantidades disponíveis) e as quantidades do nutriente aplicadas ao solo.

Além disso, é preciso dispor da curva de resposta de uma cultura (crescimento ou produção) a doses do nutriente aplicadas ao solo. Os experimentos para obter tais curvas devem ser realizados em condições de campo, onde se interagem os fatores ambientais e a fertilidade do solo.

Para o entendimento do que seja a calibração deve-se rever o conceito de nível crítico. Sob um enfoque genérico define-se nível crítico, como a concentração do nutriente no solo, que permite separar duas regiões na curva de resposta, uma de incrementos intensos da produção e outra de incrementos menores. Esta mesma definição pode ser expressa em termos mais genéricos como sendo o teor do nutriente que, possibilita separar um grupo de solo em populações de baixa e alta probabilidade de resposta às adições do nutriente em questão.

No entanto, sob um ponto de vista concreto, define-se nível crítico (NiCri) como a concentração do nutriente no solo que corresponde à disponibilidade necessária para obter a produção de máxima eficiência econômica, quando os outros nutrientes e fatores de produção estão em níveis adequados. Esta definição é mais realística por levar em conta a produção de máxima eficiência econômica que deve ser uma das metas da atividade agrícola, embora associada à sustentabilidade da atividade e do ambiente.

O NiCri agrupa os solos em duas classes de disponibilidade (ou classes de fertilidade): baixa e adequada. Este critério é, no entanto, insuficiente para uma melhor discriminação dos solos. Isto é possível estabelecendo-se outras classes de fertilidade (Quadro 12).

Concluído os estudos relativos à estas etapas, os teores dos nutrientes no solo obtidos por um determinado método torna-se um instrumento útil para interpretar a disponibilidade deste no solo. Reafirmamos que, estas etapas são executadas por pesquisadores, para que a análise de solo seja um instrumento de avaliação de fertilidade.

Quadro 12. Produção relativa e teores de P obtido pelo método Mehlich-1, que definem as classes de fertilidade para soja no Latossolo Vermelho-Escuro argiloso.

Produção Relativa (%)	Classes de Fertilidade	Teores de P (mg/dm ³)
< 50	Muito Baixa (Mb)	< 2,4
50 – 70	Baixa (b)	2,4 – 4,3

70 – 90	Média (M)	4,3 – 7,1
90 – 100	Boa (B)	7,1– 10,9
> 100	Muito boa (MB)	> 10,9

As pesquisas têm sido conduzidas para atingir critérios mais genéricos de interpretação. Assim, os níveis críticos e as classes de fertilidade são definidas de um modo genérico para todos os solos e independente da cultura. Infelizmente esta se cometendo um grande equívoco, pois se sabe que o nível crítico e, conseqüentemente, as classes de fertilidade variam com a espécie da planta, com a idade da planta, com o nível de produtividade e com o tipo de solo.

Para aprimorar-se a análise de solo como instrumento de avaliação da fertilidade solo, as pesquisas estão direcionadas para definição de níveis críticos e classes de fertilidade mais específicos. Grandes avanços têm sido feitos, sendo que, atualmente, os critérios adotados na maioria das regiões do Brasil, já levam em consideração a variação que existe entre os solos.

O último passo da etapa de calibração é a definição das doses de fertilização para cada classe de fertilidade. Até o momento não existem critérios precisos para determinação destas doses. Em geral elas são estabelecidas com base na experimentação que se tem com cada cultura, elaborando-se as conhecidas tabelas de adubação. Em geral estas tabelas são publicadas em guias para interpretação de análise de solo e recomendação de adubação. Para o estado de São Paulo, por exemplo, estas são publicadas no Boletim número 100 do Instituto Agrônomo de Campinas, cuja última versão foi atualizada em 1996. Em Minas Gerais estas orientações constam das Aproximações das Recomendações para Uso de Corretivos e Fertilizantes, publicadas pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Atualmente encontra-se em vigor a 5ª Aproximação editada em 1999. Em Pernambuco foi publicada em 1998 a 1ª. Versão do Manual de recomendação de adubação.

1.11.7.4. Interpretação da análise de solo

O primeiro passo para a interpretação de uma análise de solo é verificar se os critérios de interpretação que serão empregados são para os métodos analíticos utilizados na análise do solo, os quais devem estar descritos junto aos resultados (veja rodapé do Quadro 11).

Nos Quadros 13, 14, 15, 16 e 17 apresentam-se os critérios de interpretação de acordo com os métodos analíticos adotados em Minas Gerais e que constam da 5ª Aproximação.

Chama-se atenção para a interpretação das análises para P, S e Zn, que levam em consideração características do solo relacionada com o seu fator capacidade tampão. Para o P leva-se em conta o teor de argila ou o teor de fósforo remanescente e para o S e Zn os teores de fósforo remanescente. Estas considerações correspondem, em parte, aos avanços, mencionados e alguns parágrafos anteriores, relativos à calibração de métodos de análise de solo.

Quadro 13. Classes de interpretação para a acidez ativa do solo

Característica	Classificação química						
	Ac. muito elevada	Acidez elevada	Acidez média	Acidez fraca	Neutra	Alcalinidade fraca	Alcalinidade elevada
pH ^{1/}	< 4,5	4,5 - 5,0	5,1 - 6,0	6,1 - 6,9	7,0	7,1 - 7,8	> 7,8
	Classificação agronômica ^{2/}						
	Muito baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito alto		
pH ^{1/}	< 4,5	4,5 - 5,4	5,5 - 6,0	6,1 - 7,0	> 7,0		

^{1/} pH em H₂O, relação 1:2,5, TFSA: H₂O. ^{2/} A qualificação utilizada indica adequado (Bom) ou inadequado (Baixo ou Alto).

Quadro 14. Classes de interpretação de fertilidade do solo para a matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica

Característica	Unidade ^{1/}	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio ^{2/}	Bom	Muito bom
Carbono orgânico (C.O.) ^{3/}	dag/kg	≤ 0,40	0,41 - 1,16	1,17 - 2,32	2,33 - 4,06	> 4,06
Matéria orgânica (M.O.) ^{3/}	dag/kg	≤ 0,70	0,71 - 2,00	2,01 - 4,00	4,01 - 7,00	> 7,00
Cálcio trocável (Ca ²⁺) ^{4/}	cmol _c /dm ³	≤ 0,40	0,41 - 1,20	1,21 - 2,40	2,41 - 4,00	> 4,00
Magnésio trocável (Mg ²⁺) ^{4/}	cmol _c /dm ³	≤ 0,15	0,16 - 0,45	0,46 - 0,90	0,91 - 1,50	> 1,50
Acidez trocável (Al ³⁺) ^{4/}	cmol _c /dm ³	≤ 0,20	0,21 - 0,50	0,51 - 1,00	1,01 - 2,00 ^{11/}	> 2,00 ^{11/}
Soma de bases (SB) ^{5/}	cmol _c /dm ³	≤ 0,60	0,61 - 1,80	1,81 - 3,60	3,61 - 6,00	> 6,00
Acidez potencial (H+Al) ^{6/}	cmol _c /dm ³	≤ 1,00	1,01 - 2,50	2,51 - 5,00	5,01 - 9,00 ^{11/}	> 9,00 ^{11/}

CTC efetiva (t) ^{2/}	cmol _c /dm ³	≤ 0,80	0,81 - 2,30	2,31 - 4,60	4,61 - 8,00	> 8,00
CTC pH 7 (T) ^{8/}	cmol _c /dm ³	≤ 1,60	1,61 - 4,30	4,31 - 8,60	8,61 - 15,00	> 15,00
Saturação por Al (m) ^{9/}	%	≤ 15,0	15,1 - 30,0	30,1 - 50,0	50,1 - 75,0 ^{11/}	> 75,00 ^{11/}
Saturação por bases (V) ^{10/}	%	≤ 20,0	20,1 - 40,0	40,1 - 60,0	60,1 - 80,0	> 80,00

^{1/} dag/kg = % p/p; cmol_c/dm³ = meq/100 cm³. ^{2/} O limite superior desta classe indica o nível crítico.

^{3/} Método Walkley & Black; M.O. = 1,724 (C.O.). ^{4/} Método KCl 1 mol/L. ^{5/} SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺.

^{6/} Método Ca(OAc)₂ 0,5 mol/L, pH 7. ^{7/} t = SB + Al³⁺. ^{8/} T = SB + (H+Al). ^{9/} m = 100 Al³⁺/t.

^{10/} V = 100 SB/T. ^{11/} A interpretação destas características, nestas classes, deve ser alta e muito alta em lugar de bom e muito bom.

Quadro 15. Classes de interpretação da disponibilidade para o potássio e para o fósforo de acordo com o teor de argila do solo e do valor de fósforo remanescente (P rem)

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

^{1/} mg/dm³ = ppm p/v. ^{2/} Método Mehlich-1. ^{3/} O limite superior desta classe indica o nível crítico.

^{4/} Nesta classe apresentam-se os níveis críticos de acordo com o teor de argila ou com o valor do fósforo remanescente. ^{5/} P rem = Fósforo remanescente, concentração de fósforo da solução de equilíbrio após agitar durante 1 h a TFSA com solução de CaCl₂ 10 mmol/L, contendo 60 mg/L de P, na relação 1:10.

Quadro 16. Classes de interpretação da disponibilidade para o enxofre de acordo com o valor de fósforo remanescente (P rem)

Característica	Unidade ^{1/}	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio ^{2/}	Bom	Muito bom
Enxofre disponível (S) ^{3/}						
P rem: 0 - 4 mg/L	mg/dm ³	≤ 1,7	1,8 - 2,5	2,6 - 3,6	3,7 - 5,4	> 5,4
4 - 10 mg/L	mg/dm ³	≤ 2,4	2,5 - 3,6	3,7 - 5,0	5,1 - 7,5	> 7,5
10 - 19 mg/L	mg/dm ³	≤ 3,3	3,4 - 5,0	5,1 - 6,9	7,0 - 10,3	> 10,3
19 - 30 mg/L	mg/dm ³	≤ 4,6	4,7 - 6,9	7,1 - 9,4	9,5 - 14,2	> 14,2
30 - 44 mg/L	mg/dm ³	≤ 6,4	6,5 - 9,4	9,5 - 13,0	13,1 - 19,6	> 19,6
44 - 60 mg/L	mg/dm ³	≤ 8,9	9,0 - 13,0	13,1 - 18,0	18,1 - 27,0	> 27,0

^{1/} mg/dm³ = ppm p/v. ^{2/} Esta classe indica os níveis críticos de acordo com o valor do fósforo remanescente.

^{3/} Método Hoefft et al., 1973 (Ca(H₂PO₄)₂, 500 mg/L de P, em HOAc 2 mol/L).

Quadro 17. Classes de interpretação da disponibilidade para os micronutrientes

Característica	Unidade ^{1/}	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Alto
Manganês disponível (Mn) ^{3/}	mg/dm ³	<2	3-5	6-8	9-12	>12
Ferro disponível (Fe) ^{3/}	mg/dm ³	<8	9-18	19-30	31-45	>45
Cobre disponível (Cu) ^{3/}	mg/dm ³	<0,3	0,4-0,7	0,8-1,2	1,3-1,8	>1,8
Boro disponível (B) ^{4/}	mg/dm ³	<0,15	0,16-0,35	0,36-0,60	0,61-0,90	>0,90

^{1/} mg/dm³ = ppm p/v. ^{2/} Esta classe indica os níveis críticos de acordo com o valor do fósforo remanescente. ^{3/} Método Mehlich-1. ^{4/} Método água quente.

1.11.7.5. Confiabilidade nos resultados

Atendidos os preceitos da correlação e calibração dos métodos, a análise de solo, como instrumento de avaliação da fertilidade, requer como requisito básico a confiabilidade nos resultados, considerando que estes serão a base para definir doses de corretivos e de fertilização de extensas áreas.

Dentro desta ótica, ressalta-se que, a exatidão ou fidelidade dos resultados depende principalmente da qualidade da amostra do solo. Apesar dos critérios para

amostragem já terem sido tratados, justifica-se ressaltar alguns aspectos mais relevantes.

O sucesso da amostragem inicia-se pela estratificação da área ou paisagem a ser amostrada, definindo-se as glebas ou unidades de amostragem (U.A.). Lembre-se, que considera-se gleba uma área, independente do tamanho, mas uniforme quanto ao relevo, vegetação, características do solo (cor, textura, drenagem) e ao uso anterior e atual, etc.

Além disso a amostra composta deverá ser representativa do volume de solo da unidade de amostragem. Para tanto, as subamostras (amostras simples) devem ser coletadas em número suficiente para estimar-se fertilidade média da gleba, considerando-se uma tolerância ou desvio adequado. Embora este número dependa da variabilidade da característica do solo dentro da gleba, recomenda-se, em geral, a coleta de pelo menos 20 amostras simples por gleba. É fundamental que as amostras simples possuam o mesmo volume. Isto implica que elas sejam coletadas todas à mesma profundidade.

Na obtenção da amostra composta é importante que haja uma perfeita homogeneização das amostras simples. Além destes aspectos é importante que as amostras compostas não sofram alterações, decorrentes da contaminação ou do armazenamento por longo período, sem ser previamente seca.

Nos laboratórios outros cuidados são necessários para obter a máxima fidelidade dos resultados. Para que a amostra utilizada na análise seja representativa da amostra composta original é importante que na obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) não haja segregação. Para isso, todo o volume de solo da amostra composta deverá passar pela peneira de 2 mm, ficando retido na peneira apenas corpos estranhos ao solo, como restos culturais, pedaços de raízes e partículas minerais superiores a 2 mm (cascalho). Além disso, o solo peneirado deve ser perfeitamente homogeneizado para se obter a amostra do laboratório. Em geral os laboratórios preservam como amostra de trabalho 100 cm³ da amostra composta.

Ao ser tomado a alíquota para a análise (em geral 10 cm³) a amostra de TFSA deve ser novamente homogeneizada para evitar a segregação, ou seja, separação de agregados.

Além de todos estes aspectos, é necessário que a análise seja precisa e represente realmente a característica do resultado desejado. Para isso é fundamental que os laboratoristas sigam cuidadosamente todos os procedimentos padronizados para cada método, ou seja aqueles que foram estabelecidos nas fases de correlação e de calibração do método.

Finalmente é fundamental que se procure laboratórios idôneos e que se submetam a controles de qualidade locais ou regionais. Um grande número de laboratórios de Minas Gerais, por exemplo, estão subordinados a um Programa Interlaboratorial de Controle de Qualidade, denominado PROFERT-MG. Aqueles laboratórios qualificados são autorizados a estampar um selo do Programa em suas folhas de resultado. Existe também um Programa de qualidade de análises em laboratórios de fertilidade do solo (PQALF) coordenado pela Embrapa solos-RJ que conta com a participação de laboratórios de todo o Brasil. Programas semelhantes existem em outros estados da Federação, como o Programa do IAC para São Paulo e o Programa ROLAS, para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Bibliografia

- ALVAREZ V., V. H. **Avaliação da fertilidade do solo (Superfícies de resposta - Modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta)**. Viçosa, Impr. Univ., UFV, 1985. 75 p.
- ALVAREZ, V., V. H. Leis gerais da adubação. In: V. H. ALVAREZ V. (coord.) **Química e fertilidade do solo. Teoria**. Viçosa, Impr. Equipe, 1987. p. 60-72.
- ALVAREZ V., V.H. & CARRARO, I.M. 1976. Variabilidade do solo numa unidade de amostragem em solos de Cascavel e de Ponta Grossa, Paraná. **Rev. Ceres**, **23**:503-510.
- ARNON, D. I. & STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant physiol**, Washington, 14 : 371-375, 1939.
- ASHER, C. J. Beneficial Elements, Functional Nutrients, and Possible New Essential Elements. IN: J. J. MORTIEDT, P. M. GIORDANO & W. L. LINDSAY (eds.) **Micronutrients in Agriculture**, 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, 1991. p. 703-723.
- BARRETO, A.C.; NOVAIS, R.F. & BRAGA, J.M. 1974. Determinação estatística do número de amostras simples de solo por área para avaliação de sua fertilidade. **Rev. Ceres**, **21**:142-147.
- BRAGA, J. M. **Avaliação da fertilidade do solo (ensaios de campo)**. Viçosa, Impr. Univ., UFV, 1983. 101 p.
- BUOL, S. W. SANCHEZ, PA; CATE JR, R. B. & GRANGER, M. A. Classificación de suelos en base a su fertilidad, In: E. BORNEMISZA & A. ALVARADO (eds). **Seminário sobre manejo de suelos en la América Tropical**. Cali, Colombia, Febrero 10-14, 1974. Raleigh, North Carolina State Univesity, 1974. p. 129-144.
- CASAGRANDE, J. C. & SOUZA, O. C. Efeitos de níveis de enxofre sobre quatro gramíneas forrageiras tropicais em solos sob vegetação de cerrado do Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, 17 : 21-25. 1982.
- CATANI, R.A.; GALLO, J.R.; GARGANTINI, H. & CONAGIN, A. 1954. Amostragem de solos para estudos de fertilidade. **Bragantia**, **14**:19-26.
- DIBB, D. W. & THOMPSON JR., W. R. Interaction of potassium with other nutrients. In: R. D. MUNSON (ed). **Potassium in agriculture**. ASA, CSSA, SSSA. Madison, 1985. p. 515-533.

- EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas - Princípios e perspectivas**. Tradução e notas de E. Malavolta. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos. Ed. S.A. , 1975. 341 p.
- FASSBENDER, H. W. **Química de suelos**. San José, IICA, 1978. 398 p.
- FÉDÉRATION NATIONALE DE L'INDUSTRIE DES ENGRAIS. **La fertilization**. Paris, FNIE, 1974. 72 p.
- FONSECA, D. M. **Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para o estabelecimento de *Brachiaria decumbens*, *Andropogon gayanus* e *Hyparrhenia rufa***. Viçosa, UFV , 1986. 148 p. (Tese de Mestrado)
- LEPSCH, I. F. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso, 4ª aproximação**. Campinas, SBCS, 1983. 175 p.
- MAGNANI, R. **Alguns aspectos da aplicação da segunda lei de Mitscherlich e da equação de regressão quadrática à maturação da cana-de-açúcar**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1985. 73 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: Nutrição de plantas e fertilizantes do solo**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1976. 528 p.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1980. 254 p.
- MENGEL, K. & KIRBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 3ª ed., Bern, International Potash Institute, 1982. 655 p.
- PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 11ª ed. Piracicaba, Livraria Nobel, S.A. , 1985. 466 p.
- RAIJ, B. VAN. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba, Instituto de Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142 p.
- RIBEIRO, A. C. ; NOVAIS, R. F. de & ALVAREZ V., V. H. Propriedades físico-químicas do solo. In: V. H. ALVAREZ V. (coord.). **Química e fertilidade do solo. Teoria**. Viçosa, Impr. Equipe, 1987. p. 15-50.
- RUSSELL, E. W. & RUSSELL, E. J. **Soil conditions and plant growth**. 10th ed. London, Longmans Green, 1973. 849 p.
- SANCHEZ, P. A. **Suelos del trópico: características y manejo**. Traducción E. Camacho. San José, IICA, 1981. p. 301-353.
- SINGH, B.B. Effect of Vanadium on the growth, yield and chemical composition of maize (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**. 34:209-213, 1971.
- THOMAS, G. W. & HARGROVE, W. L. The chemistry of soil acidity. In: F. ADAMS (ed). **Soil acidity and liming**. 2ª ed. Madison. ASA, CSSA, SSSA , 1984. p. 3-56.
- TISDALE, S. L. & NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizer**. 3ª ed. New York, Collier Mc Millan International editions, 1975. 694 p.
- VITTI, G. C. & MALAVOLTA E. Fosfogesso - Uso agrícola. In: E. MALAVOLTA (coord.). **Seminário sobre corretivos agrícolas**. Campinas, Fundação Cargill, 1985. p. 159-201.
- VOISIN, A. **Adubos - Novas leis científicas de sua aplicação**. São Paulo, Mestre Jou, 1973. 130 p.

VAN DEN HENDE, A. & COTTENIE, A. 1960. L'estimation de la fertilité du sol par les méthodes chimiques nouvelles. In: Comp. Rend. des Reserarches; Travaux du Centre de Chimie Physique Agricole. Bruxelles. IRSIA n° 25. p.27-147.