

# Fertilidade do Solo

Alta Produção



Volume 1

Material Agronômico



**DARE**

TECNOLOGIA E APLICAÇÃO AGRÍCOLA

# O que contém nesse material

## 1. **Introdução a Fertilidade do Solo**

## 2. **Macro e Micronutrientes**

### 2.1 Elementos Benéficos

## 3. **Funções dos Nutrientes**

### 3.1 Nitrogênio (N)

### 3.2 Fósforo (P)

### 3.3 Enxofre (S)

### 3.4 Potássio (K)

### 3.5 Cálcio (Ca)

### 3.6 Magnésio (Mg)

### 3.7 Ferro (Fe)

### 3.8 Zinco (Zn)

### 3.9 Manganês (Mn)

### 3.10 Boro (B)

### 3.11 Molibdênio (Mo)

### 3.12 Cloro (Cl)

## 4. **Funções dos Elementos Benéficos**

### 4.1 Alumínio (Al)

### 4.2 Cobalto (Co)

### 4.3 Níquel (Ni)

### 4.4 Selênio (Se)

### 4.5 Silício (Si)

- 4. 6 Sódio (Na)
- 4. 7 Vanádio (V)

## **5. Conceito de Fertilidade do Solo**

- 5. 1 Considerações Gerais
- 5. 2 Fertilidade Natural
- 5. 3 Fertilidade Potencial
- 5. 4 Fertilidade Atual
- 5. 5 Leis Gerais da Adubação
- 5. 6 Lei da Restituição
- 5. 7 Lei do Mínimo

## **6. Lei de Mitscherlich, como Derivação da Lei do Mínimo**

- 6. 1 Lei da Interação
- 6. 2 Lei do Máximo
- 6. 3 Lei da Qualidade Biológica

## **7. Métodos e Técnicas de Avaliação da Fertilidade do solo**

- 7. 1 Análise de solo
- 7. 2 Amostragem de solo
- 7. 3 Objetivos da amostragem
- 7. 4 A variabilidade do solo
- 7. 5 A amostragem
- 7. 6 Precisão dos resultados analíticos

# **Introdução a Fertilidade do Solo**

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.

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.

## **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 ( $H_2O$ ) 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  $CO_2$  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 (*Cocus 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 = %

## 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.



# Funções dos Nutrientes

## 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  $\text{NO}_3^-$ , exceto em solos sob condições adversas a nitrificação. Uma vez absorvido o  $\text{NO}_3^-$  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 susceptível às doenças e ataque de insetos ou déficits hídricos.

O N apresenta interações com P, S e K. A absorção de  $\text{NO}_3^-$  estimula a absorção de cátions, enquanto que a absorção de  $\text{NH}_4^+$  pode restringir a absorção de cátions como o  $\text{Ca}^{2+}$ , por exemplo.

# 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 ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ ), 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 fosfolipídeos 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 fosfato 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.

## **Enxofre (S)**

Assim como o P e a maior parte do N, o S é absorvido do solo sob a forma aniônica de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 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-CH<sub>3</sub>) 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.

# 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.

# **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.

## **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.

## **Ferro (Fe)**

O Fe é constituinte de inúmeros metabólitos, podendo ser parte integrante de proteínas (ferrodoxinas 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.

## **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.

## **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.

## **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<sub>2</sub>.

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<sub>2</sub>. O cobre pode interferir no metabolismo do Fe, resultando no desenvolvimento de deficiências de Fe.

## **Boro (B)**

Existindo nas plantas na forma do ânion borato ( $\text{BO}_3^{3-}$ ) 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.

# Molibdênio (Mo)

O Mo está envolvido com várias enzimas, principalmente naquelas que atuam na fixação de N<sub>2</sub> 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.



# 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.

# **Funções dos Elementos Benéficos**

## **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  $\mu\text{mol}$  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.

## **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 acumulo 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<sub>2</sub> atmosférico. O Co é tido como elemento importante na síntese de vitamina B12, 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<sub>2</sub> pelas bactérias do gênero *Rhizobium*.

## **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.

## **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.

## **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<sub>2</sub> 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.

## **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  $\text{Na}^+$  tem-se mostrado capaz de substituir o  $\text{K}^+$  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.

## **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).



**TEMOS UMA MATÉRIA PARA  
VOCÊ !!!**

**EM NOSSO BLOG TEMOS UMA  
MATÉRIA RELACIONADA A  
ANÁLISE DE SOLO**

**ACESSE PELO LINK LOGO  
ABAIXO**

**<https://dareagro.blogspot.com/2020/06/qual-importancia-da-analise-do-solo.html>**

# **Conceito de Fertilidade do Solo**

## **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.

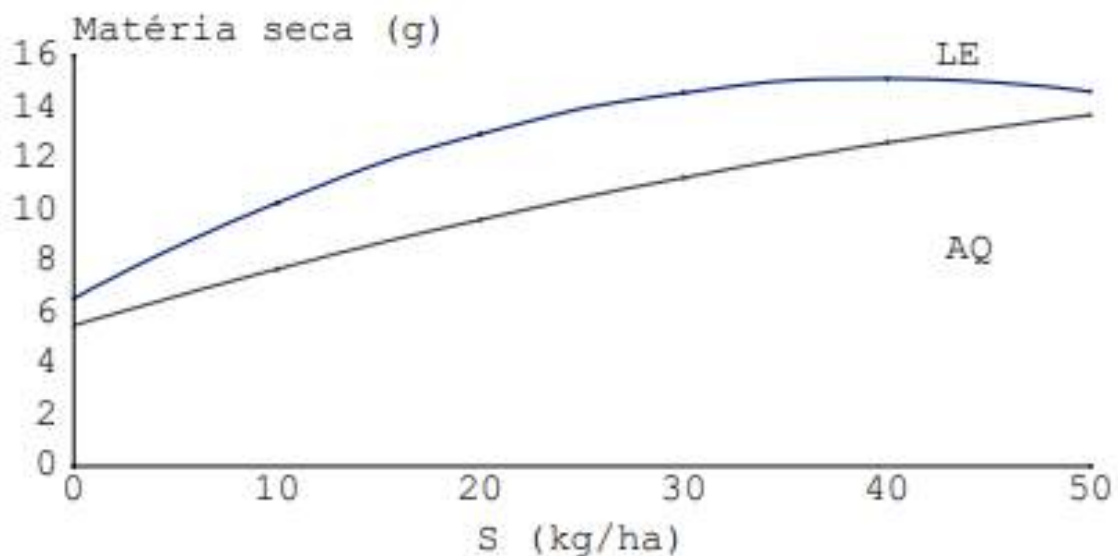
Por outro lado, um solo produtivo deve apresentar fertilidade elevada, ou ter sido, previamente, corrigido.

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 (Produção = f (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.

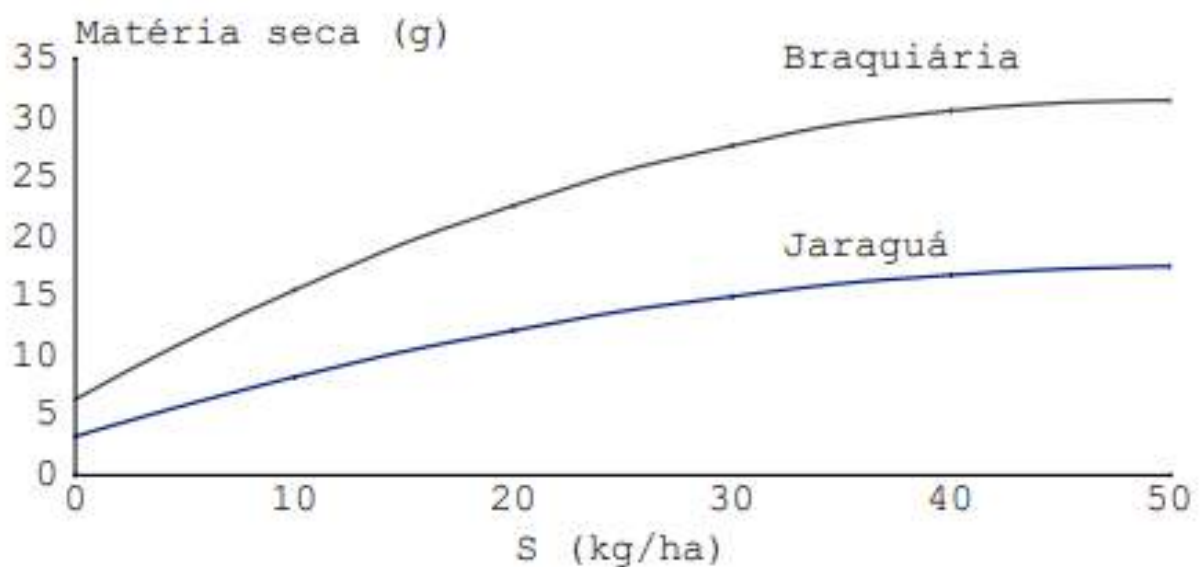


LE:  $\hat{Y} = 6,5386 + 0,4265X - 0,0053X^2$   $R^2 = 0,996$

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

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).



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

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

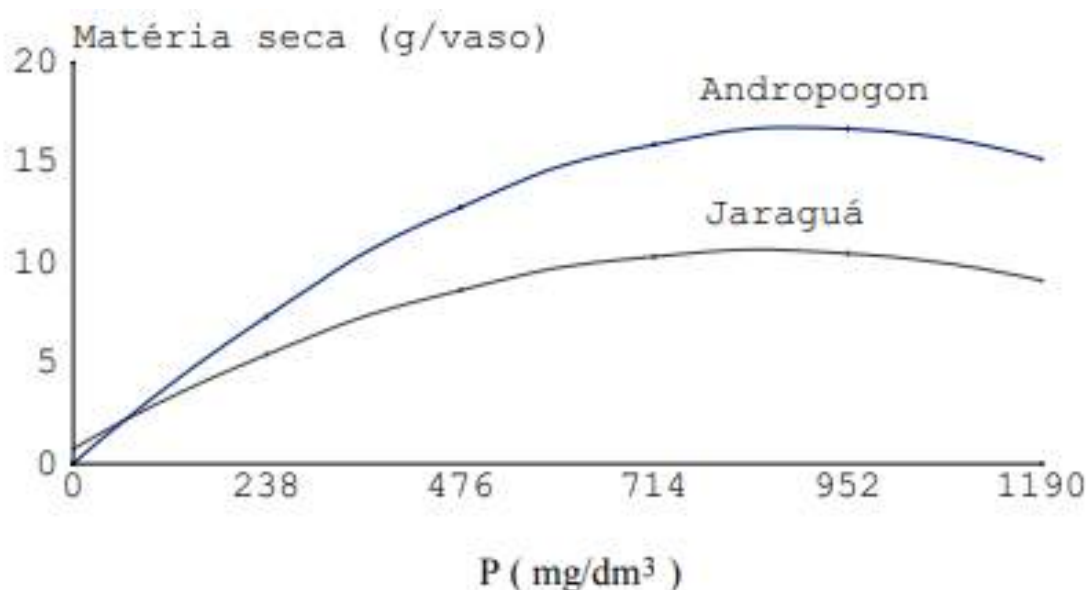
Figura 2 - Produção de matéria seca de duas espécies de gramíneas forrageiras, braquiária (*Brachiaria decumbens*) e jaraguá (*Hyparrhenia rufa*), em resposta à aplicação de cinco doses de enxofre em um Latossolo Vermelho-Escuro. FONTE: Casagrande & Souza, 1982.

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 soloplanta, 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).



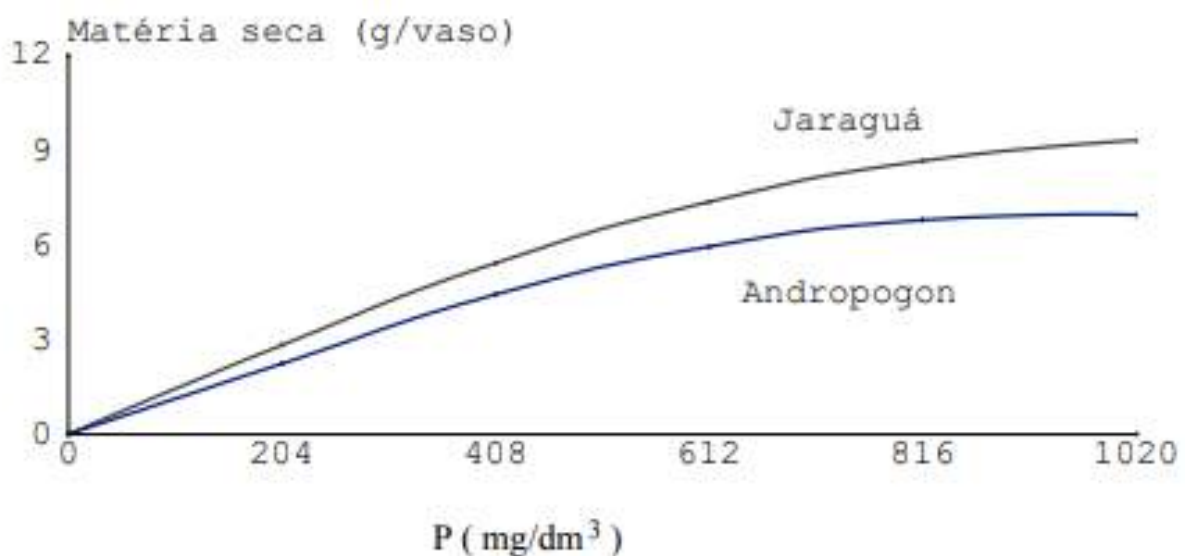
Andropogon:  $\hat{Y} = -0,4063 + 0,0375^{**}X - 0,0000205^{**}X^2$   $R^2 = 0,916$

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

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.



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

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

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.

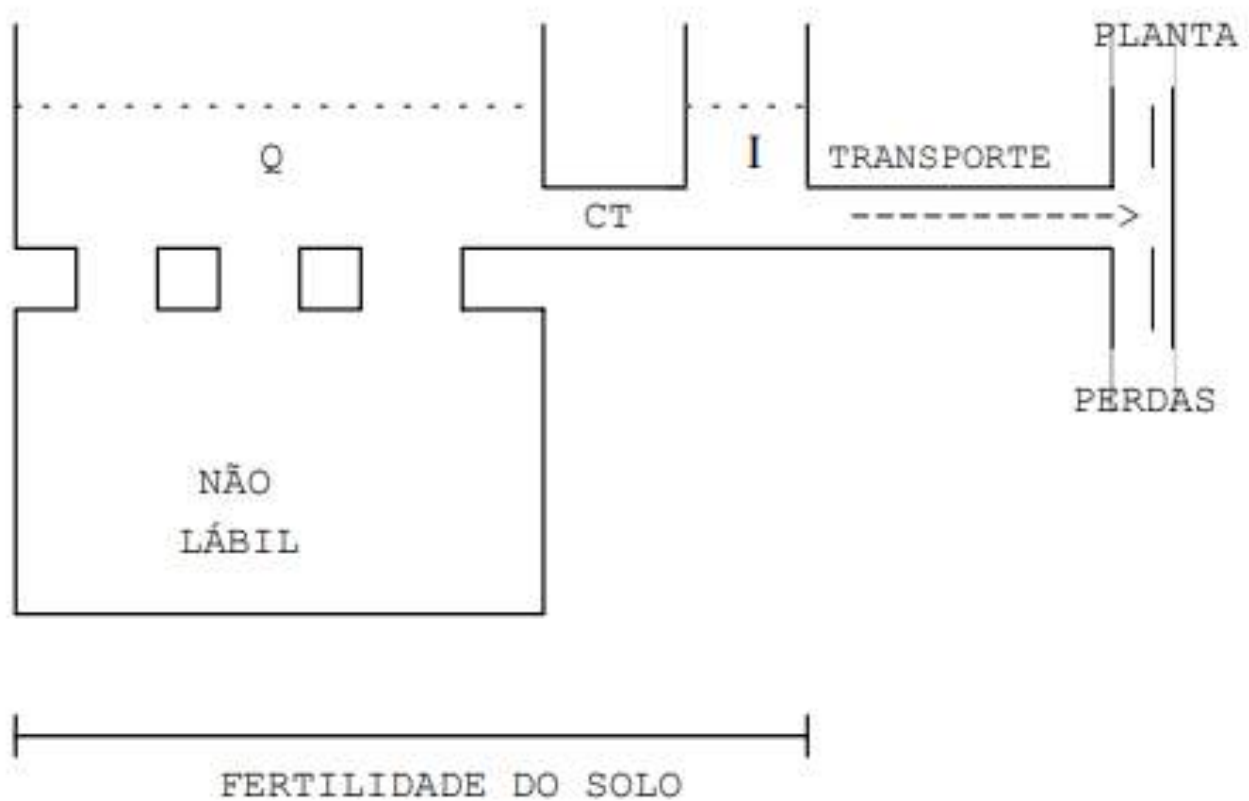


Figura 5 - Visão hidrodinâmica das interrelações entre os fatores quantidade (Q), intensidade (I) e capacidade tampão (CT), que definem a fertilidade de um solo. FONTE: Ribeiro et al., 1987.

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).

# 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
	----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> -----		%
Eutrófico	2	3	66,7
Distrófico	7	15	46,7

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

## 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<sup>3+</sup> 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  $\text{Na}^+$ , 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	----- kg / ha-----		
		+ Gesso *	- Gesso	Diferença
- 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. Lárás)	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.

# **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.

## **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.

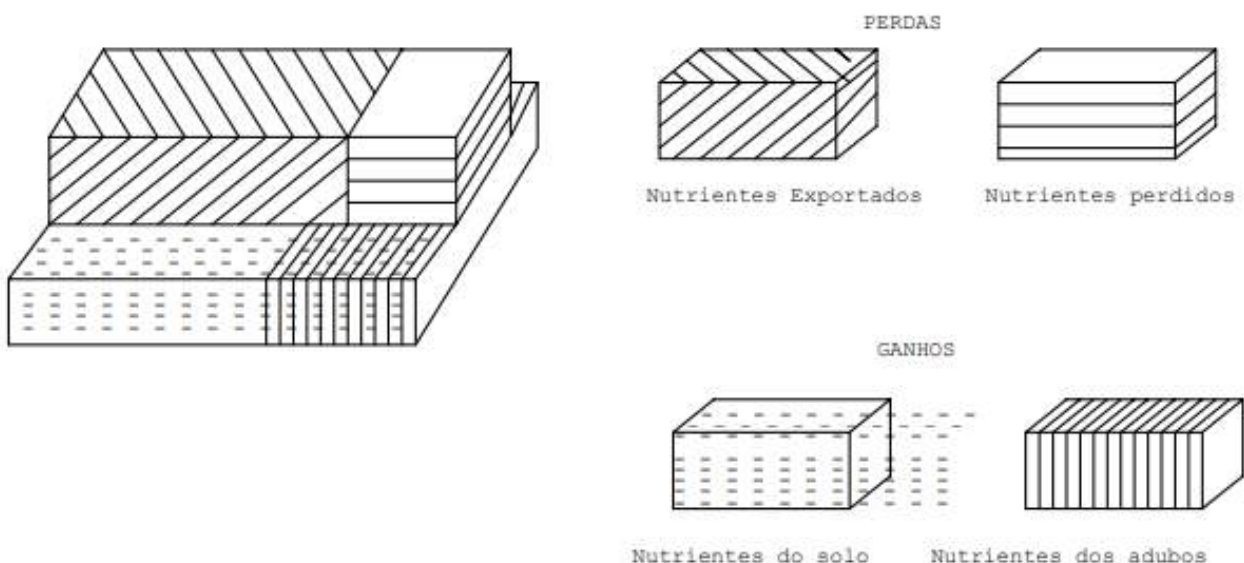
Os princípios da adubação são provenientes de três leis fundamentais: lei da restituição, lei do mínimo e lei do máximo e de duas derivações da lei do mínimo: lei dos incrementos decrescentes e lei da interação e uma derivada da lei do máximo: lei da qualidade biológica (Voisin, 1973).

# 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.



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.

# 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; Raij, 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:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X$$

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 ( $N_1 - N_2$ ).

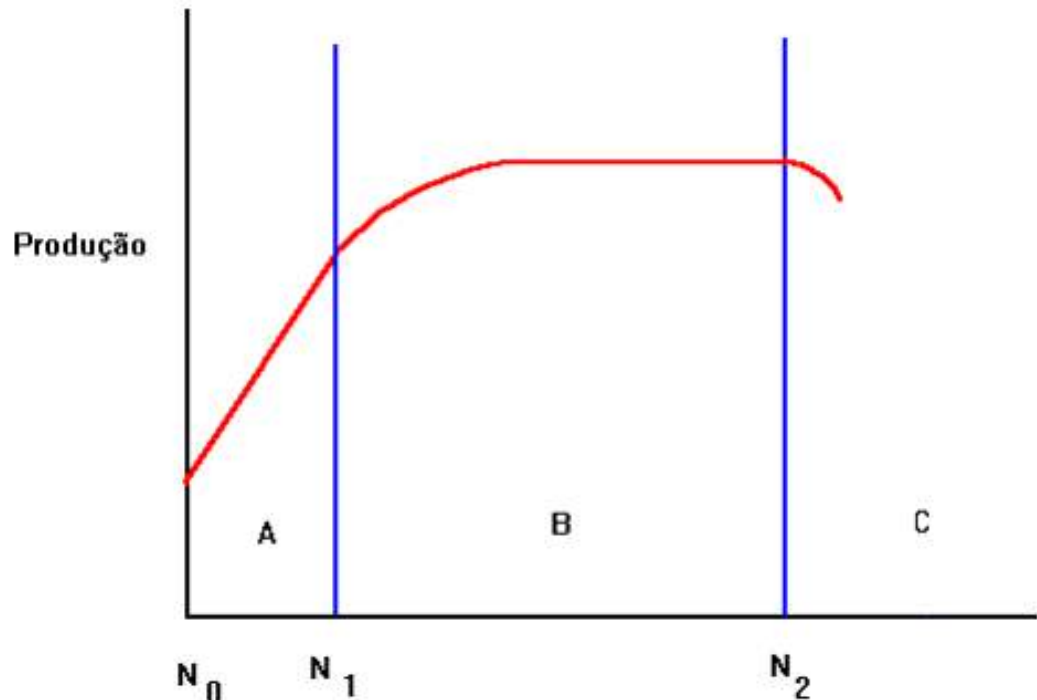


Figura 7 - Curva de resposta à adição de um nutriente. FONTE: Alvarez V. (1985).

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.

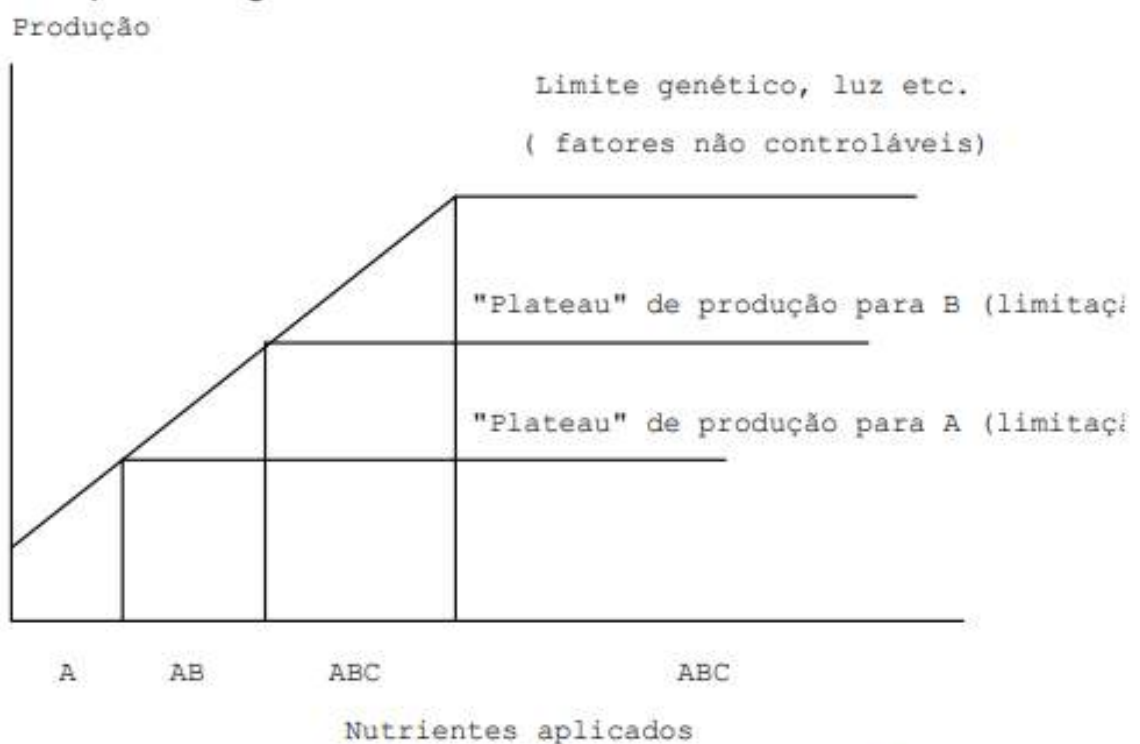


Figura 8. Resposta linear à adição de nutrientes baseada na Lei do Mínimo.



# **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:

$$\delta Y = c(A - Y) \delta X$$

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  $\delta Y$  é proporcional ao crescimento das doses do nutriente  $\delta X$  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  $A$ ,  $\delta Y$  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.

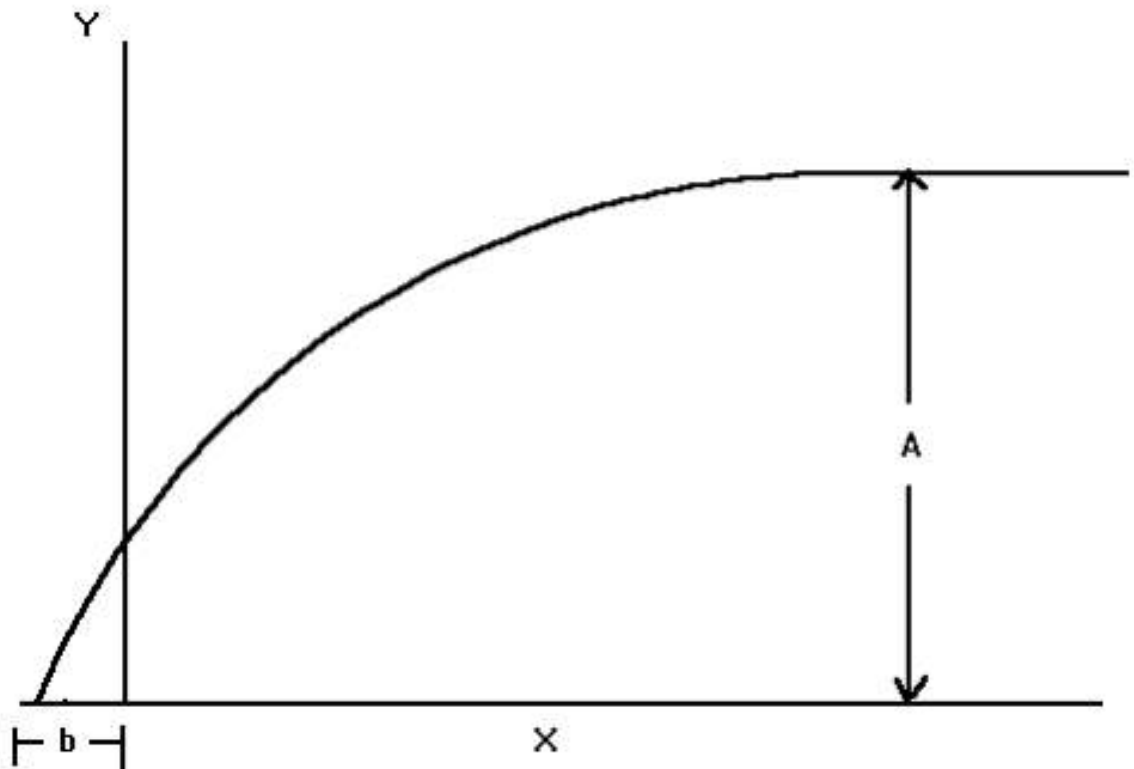


Figura 9. Representação gráfica da equação de Mitscherlich.

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:

$$\hat{Y}_1 = A(1 - 10^{-c(X + b)})$$

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, conseqüência 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:

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

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).

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, conseqüência 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:

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

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).

# 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:

$$Y = f(X_i // \phi_i, X_j, X_k) + \varepsilon_{ijk}$$

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 ( $\mu_{ijk}$ ); 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  $\epsilon_{ijk}$  (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 H<sub>2</sub>O 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; Dibb & 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 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (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).

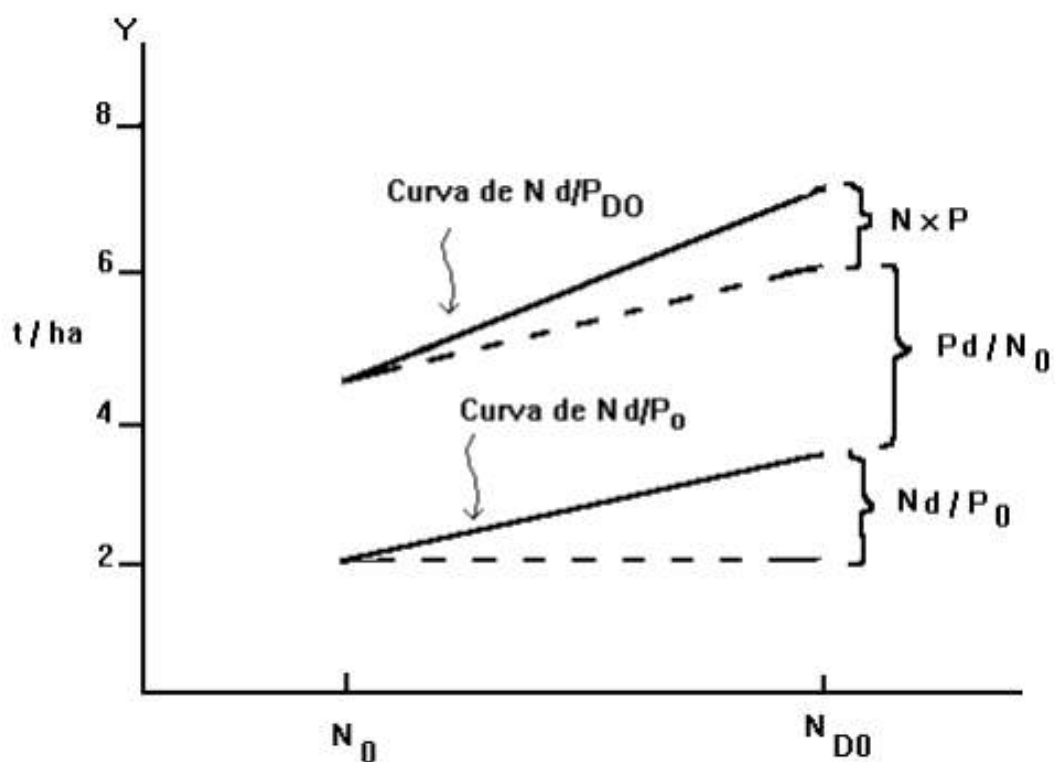


Figura 10. Efeito do N na ausência de P ( $N d/P_0$ ), do P na ausência de N ( $P d/N_0$ ) e da interação N, P ( $N \times P$ ).

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 ( $\text{NO}_3^-$ ), e sua redução para constituir aminoácidos. Se ocorrer elevação na concentração de S, diminui a de  $\text{NO}_3^-$  e, ao contrário, ocorrerá acúmulo de  $\text{NO}_3^-$  na planta.

## **Lei do Máximo**

Normalmente, ao se aumentar ainda mais as doses de um nutriente (acima de  $\text{N}_2$ , 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:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X - b_2X^2$$

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:

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

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

# 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.

# **Métodos e Técnicas de Avaliação da Fertilidade do solo**

## **Análise de solo**

## **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.

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 pedons\*, 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

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



# 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.

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.

## **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 distâncias, 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 micro variações referem-se a diferenças nas características dentro das unidades de amostragem ou extratos, verificadas à pequenas distâncias (da ordem de a 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 <sup>1'</sup>
	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	
LV - P. Grossa (PR)	27	29	29	44	15	14	4	

<sup>1'</sup> 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
15	13,9	7,5

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

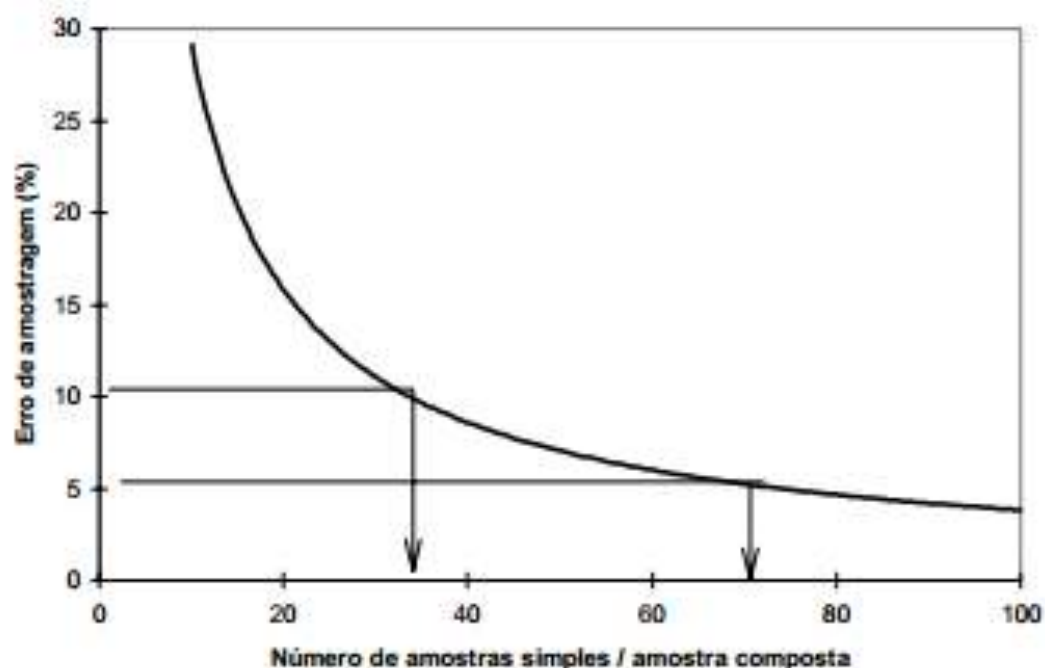


Figura 12. Variação dos erros de amostragem em função do número de amostras simples por amostra composta.

# **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 (m<sup>2</sup> ou ha) para cada extrato ou unidade de amostragem. Recomenda-se, no entanto, que, extratos muito grandes sejam subdivididos em sub estratos 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 até 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, enxadão, 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, enxadão ou pá. Com a utilização de sondas o volume de solo em cada amostra é mais uniforme.

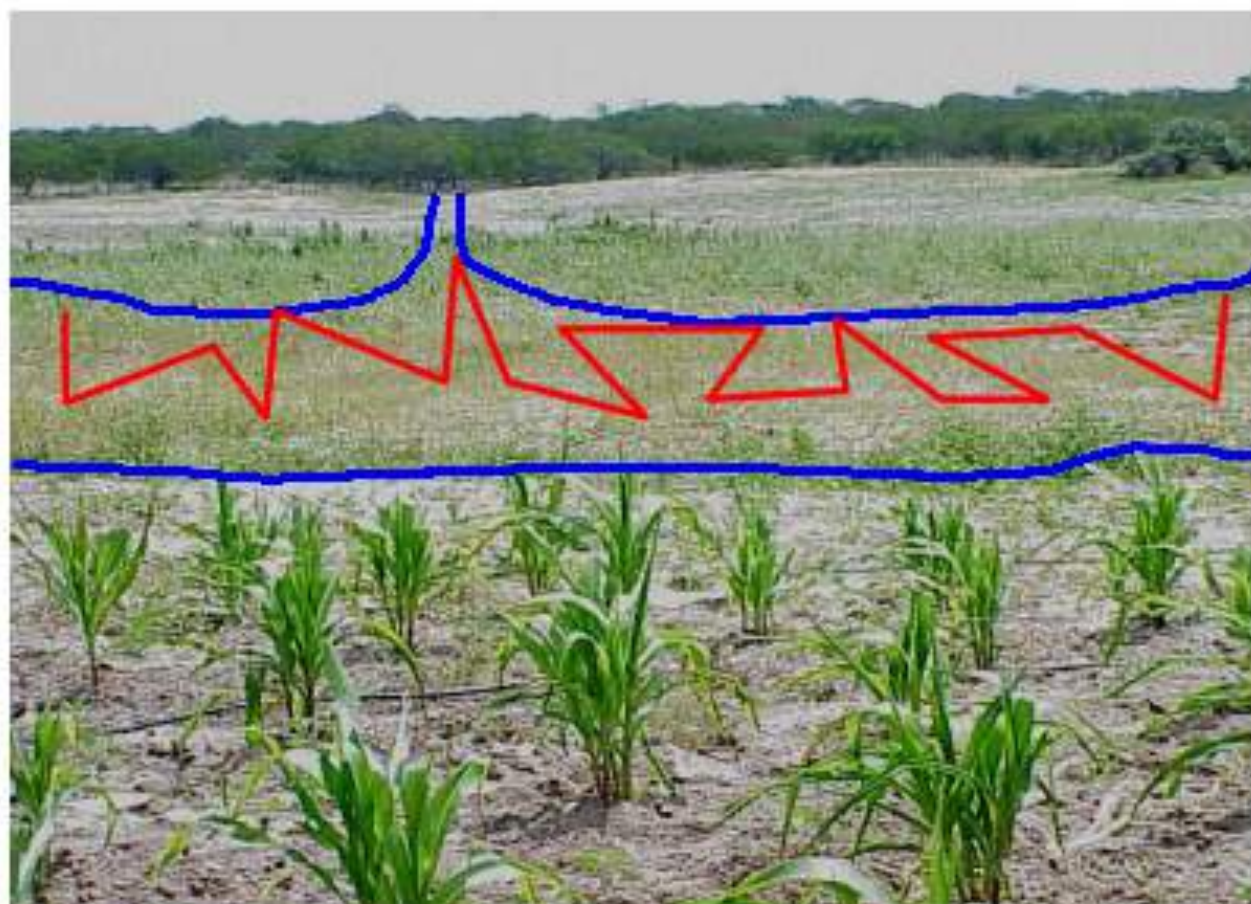


Figura 13 Esquema de distribuição aleatória dos pontos de coleta de amostras simples em uma unidade de amostragem, segundo um caminhamento em ziguezague.

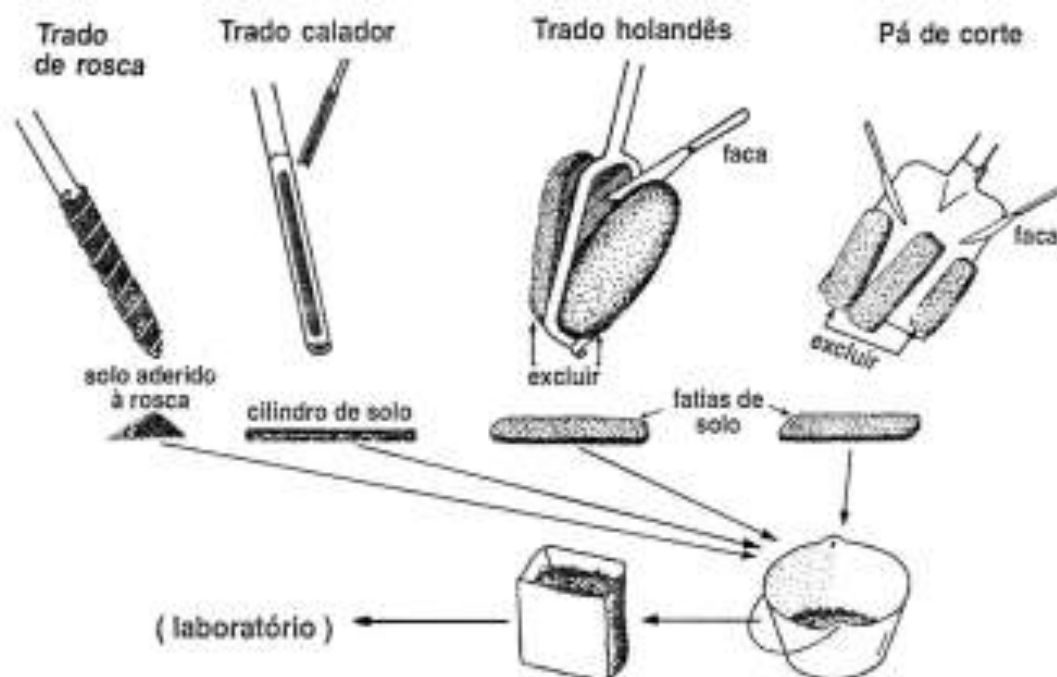


Figura 14. Equipamentos mais comuns utilizados na coleta de amostras de solo.

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.

# 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 ( $\epsilon_{an}$ ), 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 Laboratórios 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 <sup>2+</sup>	2,32	Matéria Orgânica	3,21
Mg <sup>2+</sup>	4,48	N total	2,33
Al <sup>3+</sup>	5,53	P-remanescente	1,74

# 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. Clasificación de suelos en base a su fertilidad, In: E, BORNEMISZA & A. ALVARADO (eds). Seminario sobre manejo de suelos en la América Tropical. Cali, Colombia, Febrero 10-14, 1974. Raleigh, North Carolina State University, 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.