

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
“LATO SENSU” (ESPECIALIZAÇÃO) A DISTÂNCIA
FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO
DE PLANTAS NO AGRONEGÓCIO**

**RECOMENDAÇÃO E APLICAÇÃO
DE NUTRIENTES VIA FOLIAR**

Ciro A. Rosolem

**Universidade Federal de Lavras - UFLA
Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão -
FAEPE
Lavras - MG**

Parceria

Universidade Federal de Lavras - UFLA
Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão - FAEPE

Reitor

Antônio Nazareno Guimarães Mendes

Vice-Reitor

Ricardo Pereira Reis

Diretor da Editora

Marco Antônio Rezende Alvarenga

Pró-Reitor de Pós-Graduação

Joel Augusto Muniz

Pró-Reitor Adjunto de Pós-Graduação “Lato Sensu”

Marcelo Silva de Oliveira

Coordenador do Curso

José Maria de Lima

Presidente do Conselho Deliberativo da FAEPE

Edson Ampélio Pozza

Editoração

Centro de Editoração/FAEPE

Impressão

Gráfica Universitária/UFLA

**Ficha Catalográfica preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Rosolem, Ciro A.

Recomendação e aplicação de nutrientes via foliar / Ciro A.
Rosolem. Lavras: UFLA/FAEPE, 2002.

98 p.: il. - Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Especialização) a
Distância: Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas no Agronegócio.

Bibliografia

1. Adubação foliar. 2. Absorção de nutriente. 3. Aplicação. 4.
Permeabilidade. I. Rosolem, C.A. II. Universidade Federal de Lavras.
III. Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão. IV. Título.

CDD – 581.1335
- 931.816
- 631.86

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida,
por qualquer meio ou forma, sem a prévia autorização.

SUMÁRIO

1. PRINCÍPIOS DE ADUBAÇÃO FOLIAR	5
1.1. INTRODUÇÃO.....	5
1.2. ORGANIZAÇÃO INTERNA DA FOLHA	6
1.3. O CAMINHO ATÉ O SIMPLASTO	10
1.4. PENETRAÇÃO VIA CUTICULAR E VIA ESTOMATAL	12
1.5. PENETRAÇÃO VIA CUTICULAR.....	14
1.6. PENETRAÇÃO VIA ESTÔMATOS	17
1.7. ABSORÇÃO FOLIAR E RADICULAR	18
1.8. ABSORÇÃO PROPRIAMENTE DITA.....	20
1.9. TRANSLOCAÇÃO DO NUTRIENTE ABSORVIDO	21
1.9.1. Transporte na Folha.....	21
1.9.2. Transporte a Longa Distância	22
1.10. FATORES QUE INFLUENCIAM A ABSORÇÃO FOLIAR.....	34
1.10.1. Fatores Intrínsecos	35
1.10.2. Fatores Externos.....	37
1.11. FILOSOFIAS DE APLICAÇÃO	69
1.12. ADUBAÇÃO FOLIAR PREVENTIVA.....	70
1.13. ADUBAÇÃO FOLIAR CORRETIVA.....	70
1.14. ADUBAÇÃO FOLIAR SUBSTITUTIVA.....	73
1.15. ADUBAÇÃO FOLIAR COMPLEMENTAR	77
1.16. ADUBAÇÃO FOLIAR SUPLEMENTAR NO ESTÁDIO REPRODUTIVO	79
1.17. ADUBAÇÃO FOLIAR SUPLEMENTAR ESTIMULANTE	80
1.18. CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS	83

PRINCÍPIOS DE ADUBAÇÃO FOLIAR

*Ciro A. Rosolem
Departamento de Produção Vegetal
Faculdade de Ciências Agrônomicas
UNESP/Botucatu*

1.1. INTRODUÇÃO

A absorção de água pelas folhas foi referida em 1676 por Mariote e, em 1877, Bohm relatou que sais minerais dissolvidos, como por exemplo o cálcio, eram absorvidos pela superfície foliar e usados no metabolismo da planta (Franke, 1986). Malavolta (1980) faz referência ao uso de líquido de esterqueiras (chorume), como adubo foliar, durante o século XIX, bem como ao uso de superfosfato diluído em água. Camargo e Silva (1975) citam alguns casos de uso de fertilizantes foliares na correção de carências nutricionais, também no século XIX. Entretanto, somente a partir da utilização de sulfato de ferro por Johnson no Havaí, em 1915, para resolver problemas de deficiência em abacaxi, é que a prática tornou-se mais popular no Estados Unidos, na década de 20, incrementando-se a partir dos anos 40, com a utilização conjunta de defensivos (Franke, 1986).

Apesar de tratar-se de um mercado significativo na área de fertilizantes, a adubação foliar, historicamente, tem recebido atenção limitada da pesquisa, principalmente no Brasil. Na verdade, encontram-se inúmeros trabalhos testando produtos e meios de aplicação, mas sua grande maioria, por razões que extrapolam o presente trabalho, não chegam às revistas mais importantes do País. Trabalhos que procurem caracterizar o processo de absorção foliar e entender seus mecanismos específicos são raros, mesmo na literatura internacional. A falta de informações básicas deixa técnicos, agricultores e até mesmo as empresas produtoras de fertilizantes para aplicação foliar à mercê do mercado, algumas vezes inescrupuloso, outras ingênuo, outras ainda incompetente para interpretar e aplicar adequadamente os resultados obtidos.

A falta de informações confiáveis, de resultados com forte relação causa-efeito, corroborados por testes estatísticos adequados, acaba por causar muita confusão

nesta área do agronegócio, tornando a adubação foliar um assunto sempre polêmico. Por exemplo, a recomendação generalizada de aplicação foliar de macronutrientes, em pequenas doses, raramente tem encontrado respaldo na literatura, nas condições brasileiras. Mas, como em função da pequena quantidade aplicada, seu custo é relativamente baixo, muitos agricultores se utilizam da prática, sem a mínima segurança a respeito do real benefício.

Uma série de revisões sobre o assunto já foi publicada no Brasil, dentre as quais cita-se Malavolta (1980), Rosolem (1984, 1992), Boaretto e Muraoka (1995), entre outros. De modo mais abrangente o assunto foi discutido por Camargo e Silva (1975) e Boaretto e Rosolem (1989). O presente texto tem como objetivo a compilação e interpretação da literatura existente sobre adubação foliar, procurando, sempre que possível, complementar e/ou atualizar as informações divulgadas.

Procurar-se-á, na primeira parte, discutir a estrutura da planta implicada na absorção e translocação do nutriente aplicado via foliar. Em seguida os mecanismos e limitações da prática serão contemplados criticamente, assim como serão discutidos alguns aspectos da tecnologia de aplicação dos fertilizantes foliares.

1.2. ORGANIZAÇÃO INTERNA DA FOLHA

A folha apresenta três tipos de sistemas de tecidos: epiderme, mesófilo e tecidos vasculares. Com exceção de um limitado crescimento no pecíolo e nas nervuras de maior porte, geralmente não há crescimento secundário nas folhas, permanecendo a epiderme como tecido de revestimento. O texto referente à organização interna da folha é baseado e adaptado das revisões de Rodella (1989) e Raven et al. (2001).

A epiderme é constituída de células tabulares, geralmente destituídas de cloroplastos, que revestem as superfícies (adaxial e abaxial) da lâmina foliar. Para a maioria das folhas apenas uma camada de células constitui a epiderme que, deste modo, é unisseriada, mas existem folhas com epiderme plurisseriada (mais de uma camada de células). Por vezes há ainda uma hipoderme, logo abaixo da epiderme. Apesar de variações comuns quanto à forma, disposição e tamanho das células, estas estão sempre arrançadas em uma estrutura compacta, sem espaços intercelulares.

A epiderme é revestida externamente pela cutícula, geralmente mais espessa na face adaxial que na abaxial. A cutícula é uma membrana constituída de quatro componentes essenciais: cutina, ceras, pectinas e celulose, que são secretadas através das paredes externas das células da epiderme. A composição e estrutura da cutícula é variável com a espécie (Figura 1).

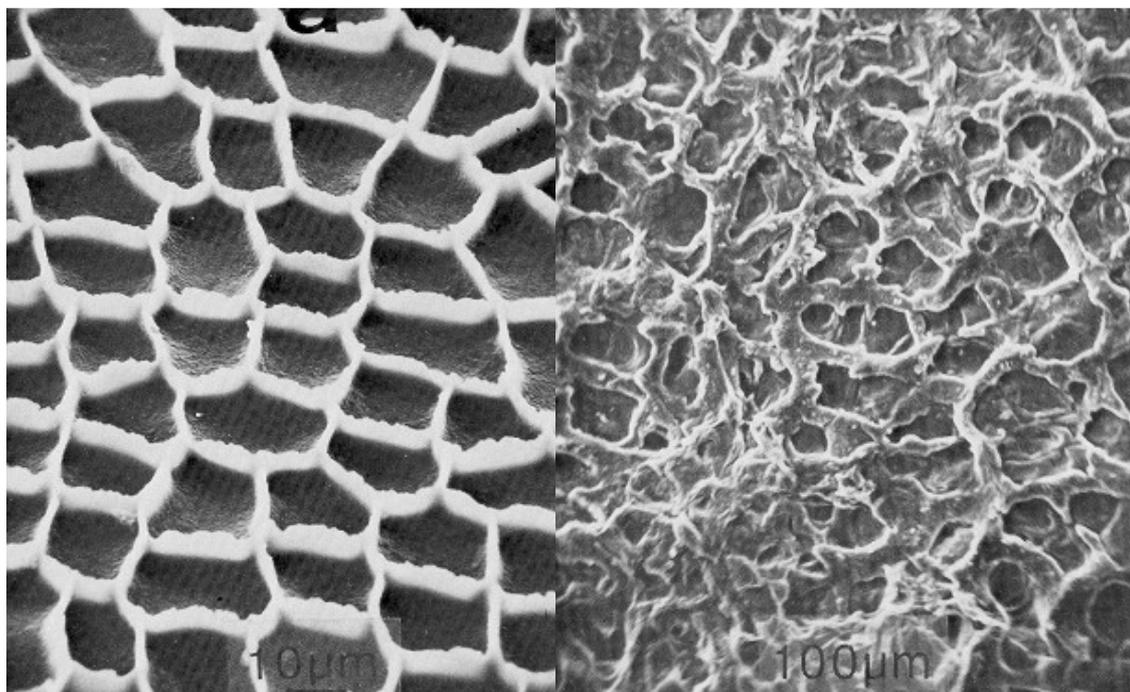


Figura 1: Microfotografia de varredura da face interna de cutículas isoladas de folhas de pereira (esquerda) e frutos de macieira(direita).

A formação da cutícula é iniciada com a síntese da procutina no protoplasma das células epidérmicas, que migra através das paredes na forma de gotículas, que acabam por extravasar na superfície. A formação da cutícula é centrípeta, uma vez que sua parte externa é a primeira a ser formada. Aí o material cuticular, em contato com o oxigênio atmosférico, sofre polimerização e oxidação, endurecendo gradualmente. A estrutura da cutícula apresenta uma matriz de cutina, contendo plaquetas de cera e lamelas de celulose. A cutina é um poliéster formado de ácidos graxos hidroxilados com cadeias de $C_{18:1}$ e $C_{16:0}$, e devido à presença de grupos hidroxílicos ela é hemihidrofílica. As ceras são uma mistura de moléculas hidrofóbicas como ácidos graxos de cadeias muito longas, hidrocarbonetos, ésteres e álcoois, que estão parcialmente embebidos na cutina.

Na parte externa a cutina é mais consistente e na parte interna que fica em contato com as paredes epidérmicas, predomina a pectina, que embebe as paredes celulares, formando uma camada esponjosa, cujos espaços são preenchidos com cera. Na parte externa da cutícula há cera amorfa e microprojeções de cera que emergem da superfície, com aspecto variado. Em muitas espécies, estruturas epicuticulares cerosas cristalinas estão sobrepostas à cera cuticular. As ceras representam o componente à prova de água da cutícula (Post-Beittenmiller, 1996). Elas impedem a perda de água, a não ser pelos estômatos, e de nutrientes por lavagem pela chuva. Devido à sua natureza hidrofóbica, as ceras impedem ou dificultam a difusão de íons hidrofílicos, o que, muitas vezes pode ser minimizado

pelo uso de surfactantes. Assim, as folhas não foram desenvolvidas para a absorção de íons hidrofílicos dissolvidos em água.

Não só a quantidade de cera presente na superfície foliar, mas também a estrutura da cera, são de grande importância, pois influem na molhabilidade da superfície.

Camadas finas de cutícula revestem ainda as células do mesófilo, que estão em contato com os espaços intercelulares. Os espaços intercelulares formam um sistema contínuo, conectado com os estômatos, sendo, portanto, a cutícula interna uma continuação da cutícula externa, que penetra através dos ostíolos.

As células da epiderme apresentam a parede externa muito espessada, sendo formada por celulose, hemicelulose, ceras e outros compostos, estando estruturadas por fibrilas de celulose (que, por sua vez, são cadeias longas formadas pela condensação de glucose) interligadas que, dependendo da textura, permitem a formação de espaços de tamanhos variáveis. Estes espaços, com tamanhos variáveis em torno de 0,01 μm , formam um sistema microcapilar, denominado sistema intermicelar, onde se depositam as inclusões das paredes que, juntamente com o material básico, são capazes de desenvolver cargas elétricas negativas, responsáveis pela capacidade de retenção e troca de íons, mas, ao mesmo tempo, serem permeáveis a água e solutos.

A epiderme apresenta ainda tricomas, freqüentemente uma via para absorção foliar, que interferem na molhabilidade da superfície; células buliformes (típicas de gramíneas e outras monocotiledôneas, ocorrendo na superfície adaxial); células silicosas e suberosas (em gramíneas); estômatos (compreendendo as células guarda, o ostíolo e as células subsidiárias). Os estômatos podem ocorrer em ambas as faces da folha (folha anfistomática), apenas na face adaxial (folha epistomática) ou apenas na face abaxial (folha hipostomática).

O mesófilo compreende os tecidos parenquimáticos localizados entre as epidermes da folha, normalmente providos de cloroplastos e de um sistema de espaços intercelulares, o clorênquima. As dicotiledôneas, principalmente, apresentam o mesófilo diferenciado em parênquima paliçádico e lacunoso. As monocotiledôneas, normalmente, apresentam o mesófilo homogêneo, isto é, não diferenciado. Em algumas gramíneas, a parte média da lâmina foliar apresenta uma quilha (“costela”), devido à diferenciação de um parênquima incolor (sem cloroplastos) no lado adaxial do mesófilo.

O apoplasto é constituído pelas paredes celulares, espaços intercelulares e interior dos vasos. Nesta região, a movimentação de água é livre, mas existem restrições químicas (cargas elétricas) e físicas à movimentação iônica, havendo ainda as restrições nas regiões total ou parcialmente impermeáveis, por deposição de compostos como a cutina, suberina, lignina e ceras, que ocorrem nas paredes celulares externas dos órgãos aéreos.

A parede celular, considerada anteriormente como meramente uma estrutura externa e inativa produzida pelo protoplasto, é agora reconhecida como tendo funções específicas e essenciais. As paredes celulares contêm uma variedade de enzimas que desempenham importantes papéis na absorção, transporte e secreção de substâncias. Elas podem também, assim como os vacúolos, servir como sítios de atividade digestiva. O principal componente da parede celular é a celulose, que determina em grande parte sua arquitetura. A celulose é constituída por numerosos monômeros de glicose ligados pelas extremidades. Essas moléculas de celulose, longas e finas, estão unidas em microfibrilas que têm cerca de 10 a 15 nanômetros de diâmetro. As microfibrilas de celulose se entrelaçam para formar finos filamentos, que podem enrolar-se uns sobre os outros, semelhantes a fios em um cabo, a macrofibrila. Cada macrofibrila mede cerca de 0,5 micrômetro de diâmetro e pode atingir até 4 micrômetros de comprimento.

O arcabouço de celulose da parede é preenchido por uma matriz de moléculas não celulósicas entrelaçadas. Essas moléculas são polissacarídeos conhecidos como hemiceluloses e pectinas, como as proteínas estruturais chamadas glicoproteínas. As pectinas, mais conhecidas por sua capacidade de formar géis, são características das primeiras camadas formadas na parede celular e também da substância intercelular que une as paredes de células contíguas. As pectinas são polissacarídeos muito hidrofílicos.

Outro componente importante da parede celular é lignina, que fornece resistência e rigidez à parede celular. Está presente em células que têm função mecânica ou de sustentação.

Para que sejam metabolizados e utilizados pelas plantas os nutrientes precisam estar localizados no simplasto, atravessando a plasmalema. O simplasto foliar compreende o conjunto dos protoplastos conectados pelos plasmodesmas, que atravessam as paredes celulares. Na células epidérmicas aparecem cavidades alongadas (conjuntos de espaços interfibrilares específicos) denominados ectodesmas, que começam na superfície da plasmalema e atravessam as paredes externas, terminando na cutícula. Os ectodesmas constituem-se em vias de acesso ao simplasto para substâncias que penetram nas folhas através da cutícula, estando relacionadas com a absorção de nutrientes, com a eliminação de substâncias pela excreção cuticular e com a lixiviação foliar.

O sistema vascular é formado pelos feixes vasculares (nervuras). Existem basicamente dois tipos de venação: reticulada (comum nas dicotiledôneas) e paralela ou estriada (comum nas monocotiledôneas). Quando os feixes vasculares são colaterais, o xilema ocorre voltado para a face adaxial da folha e o floema para a face abaxial. Nas dicotiledôneas, os feixes vasculares menores apresentam-se envolvidos por uma ou mais camadas de células dispostas compactamente, semelhantes às do mesófilo (parenquimáticas), com cloroplastos, constituindo a bainha do feixe vascular. Às vezes, a bainha do feixe está ligada à epiderme por conjuntos de células

semelhantes, estruturalmente, às células da bainha; estes conjuntos são chamados de extensões da bainha do feixe. Como tecidos de sustentação podem ocorrer colênquima ou esclerênquima. Nas monocotiledôneas, ocorrem ainda as bainhas dos feixes vasculares e as extensões das bainhas dos feixes. Podem ser distinguidos, em gramíneas, dois tipos de bainha dos feixes: simples (células parenquimáticas com ou sem cloroplastos) e dupla (a externa formada por células parenquimatosas com ou sem cloroplastos, e a interna, formada por células de paredes espessas, constituindo a bainha do mestoma). Muitas gramíneas tem o ciclo de fixação de carbono C_4 , apresentando a Estrutura de Kranz, que se caracteriza pela presença da bainha dos feixes vasculares provida de cloroplastos e a coroa de células mesofílicas, também com cloroplastos, organizada concentricamente ao redor dos feixes vasculares.

1.3. O CAMINHO ATÉ O SIMPLASTO

A cutícula constitui a primeira barreira à penetração de soluções provenientes de aplicações foliares, devendo essas soluções atravessarem a cutícula, penetrar e difundir-se no apoplasto, uma segunda barreira e, em seguida atravessar a plasmalema, a terceira barreira, para então atingirem o simplasto e serem utilizadas pela planta. Um esquema com as principais barreiras encontradas na penetração de um soluto encontra-se na Figura 2.

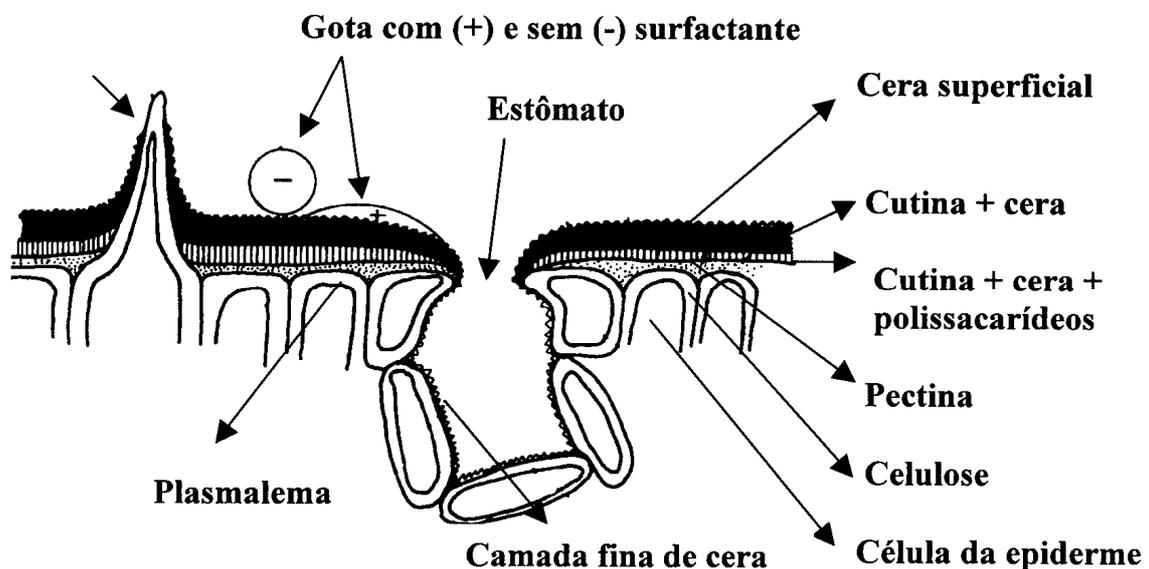


Figura 2: Representação esquemática da superfície foliar e posição das barreiras à penetração de solutos.

Na realidade, uma vez que ocorre a saída de íons por lavagem e de água por transpiração, o mesmo caminho pode ser utilizado em sentido inverso, além de demonstrar que existe uma descontinuidade na deposição de cutina e ceras, por onde se infiltra a matriz pectínácea, altamente hidrofílica.

Camargo e Silva (1975) apontaram algumas propriedades das cutículas, devidas à sua natureza e estrutura, que são muito importantes para elucidar o caminho dos materiais que entram ou saem das folhas, que são:

- **Hidrorrepelência:** que é a característica de uma superfície não se molhar. Esta propriedade depende da afinidade entre o líquido e a superfície (adesão), da afinidade entre as moléculas da solução (coesão) e da tensão superficial do líquido. A hidrorrepelência da cutícula varia em função da quantidade e tipo de cera existente.
- **Hidrofilia e Trocas Iônicas:** estas propriedades são derivadas da matriz de pectatos, altamente coloidal, e dos resíduos de carga provenientes da dissociação de grupos $-OH$ e $-COOH$ que existem nos pectatos, cutina e ceras.
- **Polaridade:** a cutícula apresenta na sua estrutura compostos de polaridade variável, o que permite que ela possa dar passagem à substâncias polares e hidrossolúveis (celulose e pectatos), bem como apolares e lipossolúveis (cutina e ceras).

Na Figura 3 encontra-se um esquema detalhado da epiderme com a cutícula e demais barreiras encontradas por um soluto durante sua penetração na folha, até atingir a membrana celular e ser de fato absorvido.

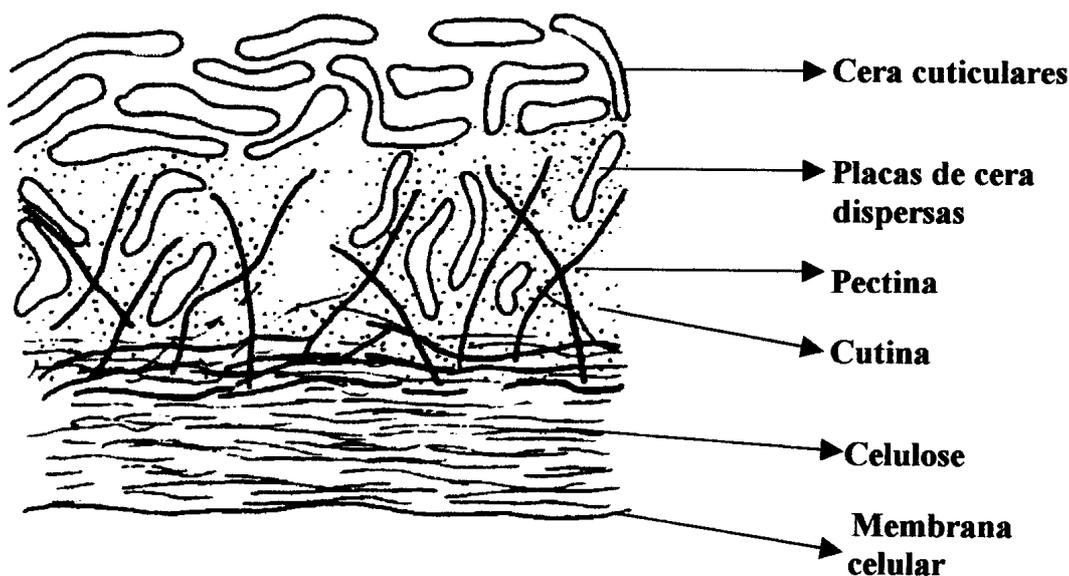


Figura 3: Estrutura da epiderme, até a plasmalema da célula epidérmica.

A cutícula é, aparentemente transversa por “caminhos” polares que são permeáveis à água e pequenas moléculas solúveis, cuja natureza e comprimento não estão claros (Neumann, 1988). Nobel (1970) calculou que o tempo para uma pequena molécula, numa solução a 10 mM, se difundir uma pequena distância (50 μm – equivalente à espessura de um célula) em meio aquoso seria de aproximadamente 0.6 segundos. Entretanto, as taxas de difusão de moléculas em solução através da cutícula dependerão do grau de molhabilidade da superfície, do comprimento, diâmetro e tortuosidade do “caminho” a ser percorrido e da extensão das resistências elétricas.

1.4. PENETRAÇÃO VIA CUTICULAR E VIA ESTOMATAL

Os conceitos dos processos envolvidos na penetração de solutos nas folhas vêm mudando com o tempo, focando na existência e papel da ectodesmata (Franke, 1967), penetração estomatal (Middleton e Sanderson, 1965), e a relevância das regiões peristomáticas (Shönherr e Bukovac, 1978). A primeira hipótese foi rejeitada ainda nos anos 60.

Por diversas décadas a absorção de água e solutos via estômatos foi objeto de controvérsia, até que a discussão foi praticamente encerrada por Shönherr e Bukovac (1972). Eles demonstraram que a penetração de soluções aquosas através dos estômatos era impossível por razões físicas relacionadas à arquitetura e características da superfície dos estômatos e ainda à alta tensão superficial das soluções aquosas. Assim, para ocorrer penetração estomatal, a solução deveria ter uma tensão superficial menor que 30 mN m^{-1} . Daí em diante, a absorção foliar foi tida como ocorrendo somente pela cutícula, numa generalização implícita. Entretanto, é comum um grande impacto da densidade estomatal ou da abertura estomática na absorção foliar.

Recentemente foi demonstrada a existência de finos filmes de água em superfícies de folhas aparentemente secas (Burkhardt e Eiden, 1994). Os filmes de água se desenvolvem quando sais higroscópicos presentes na superfície foliar ficam deliquescentes, isto é, quando eles absorvem vapor de água da atmosfera ou da transpiração da própria planta e se dissolvem. Eles podem existir em humidades relativas muito abaixo da saturação, dependendo do ponto de deliquescência do sal. Uma vez que estes filmes são capazes de cobrir superfícies tidas como não molháveis e desde que eles são microscopicamente finos, não há razão física contendo sua expansão através dos estômatos (Burkhardt, 1994). Eichert et al. (1998) mostraram que a absorção de uranina, um íon grande, foi aumentada em 30 vezes quando os estômatos estavam abertos, em relação a estômatos fechados. Como a máxima absorção foi observada durante o processo de secamento, os autores concluíram que a penetração ocorreu via estomatal através de finos filmes de água.

Assim, hoje se aceita que há penetração de solutos nas folhas através da cutícula e através dos estômatos.

Independentemente da via de penetração, o íon deverá, para atingir a plasmalema, atravessar a cutícula ou a parede celular, que têm cargas negativas. Na figura 4 encontra-se um esquema dos poros encontrados na parede celular, com suas cargas e efeito na penetração de substâncias. Deste modo, ânions e substâncias sem carga têm trânsito livre na matriz, tendo o movimento limitado apenas pelo tamanho da molécula em relação ao tamanho dos poros, ao passo que substância com carga positiva serão ligadas às paredes, tendo melhor penetração apenas quando as cargas das paredes estiverem saturadas. Além disso há uma limitação física à passagem dos íons, uma vez que, tanto a matriz da cutícula como da parede celular forma uma rede de poros pelos quais a substância deve passar. Assim, o diâmetros desses poros pode ser uma barreira à penetração. Na tabela 1 encontram-se os diâmetros comparados das matrizes e de alguns solutos.

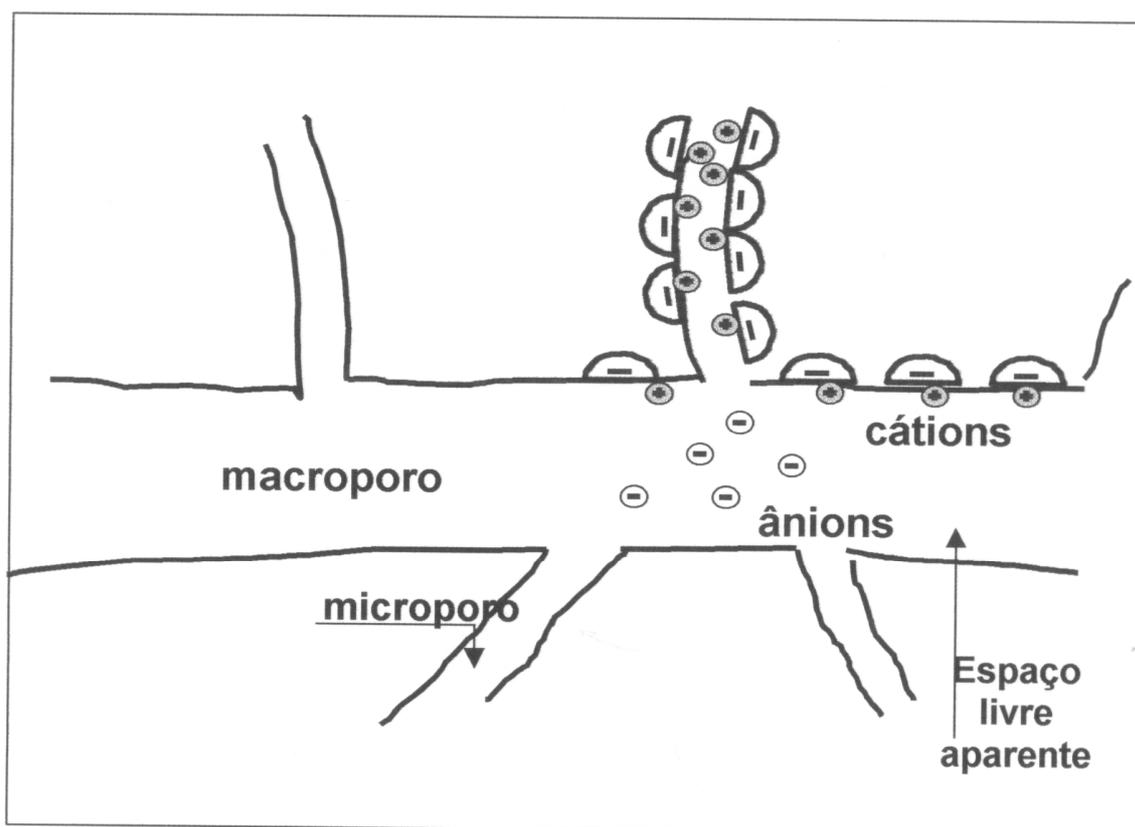


Figura 4: Esquema da distribuição da porosidade em paredes celulares, com suas respectivas cargas e efeito na difusão de íons.

Tabela 1: Diâmetros comparados do poros de paredes celulares e alguns solutos.

Material	Diâmetro do poro, nm
Poros da parede celular	< 5
Sacarose	1,0
Íons hidratados	
K ⁺	0,66
Ca ⁺⁺	0,82

1.5. PENETRAÇÃO VIA CUTICULAR

A análise da composição mineral de cutículas isoladas enzimaticamente sugere que as cutículas têm propriedades específicas de retenção iônica (Chamel et al., 1979), podendo ser considerada um polieletrólito com ponto de carga zero em torno de 3,0. Isso significa que em pH acima de 3,0 as cutículas apresentam cargas negativas (Schönherr e Huber, 1977) e os grupos carboxílicos fixam firmemente o Ca. Por exemplo, o Ca aplicado como CaCl₂ pode ser facilmente retido na cutícula de frutos de macieira (Figura 5), de modo que mais de 80 % da retenção ocorre nos primeiros minutos, sendo o equilíbrio atingido depois de 1 a 3 horas. Foi possível discriminar entre a fração adsorvida correspondente ao Ca como íon livre, presente nos espaços intracuticulares, que foi liberado durante a lavagem com água deionizada, e uma fração trocável, atribuída a Ca⁺², fixado em sítios da matriz cuticular com cargas negativas, recuperado por lavagem com HCl (Figura 5). A porção trocável pode ser facilmente determinada devido à alta seletividade dos constituintes cuticulares pelo Ca, que preveniu perdas do Ca trocável durante a lavagem por 3 horas com água deionizada. A retenção do Ca aumentou com a concentração da solução, para soluções diluídas, mas foi rapidamente saturada com concentração acima de 1 meq de Ca L⁻¹. A retenção ocorreu, aparentemente na matriz cuticular, e não na fração lipídica.

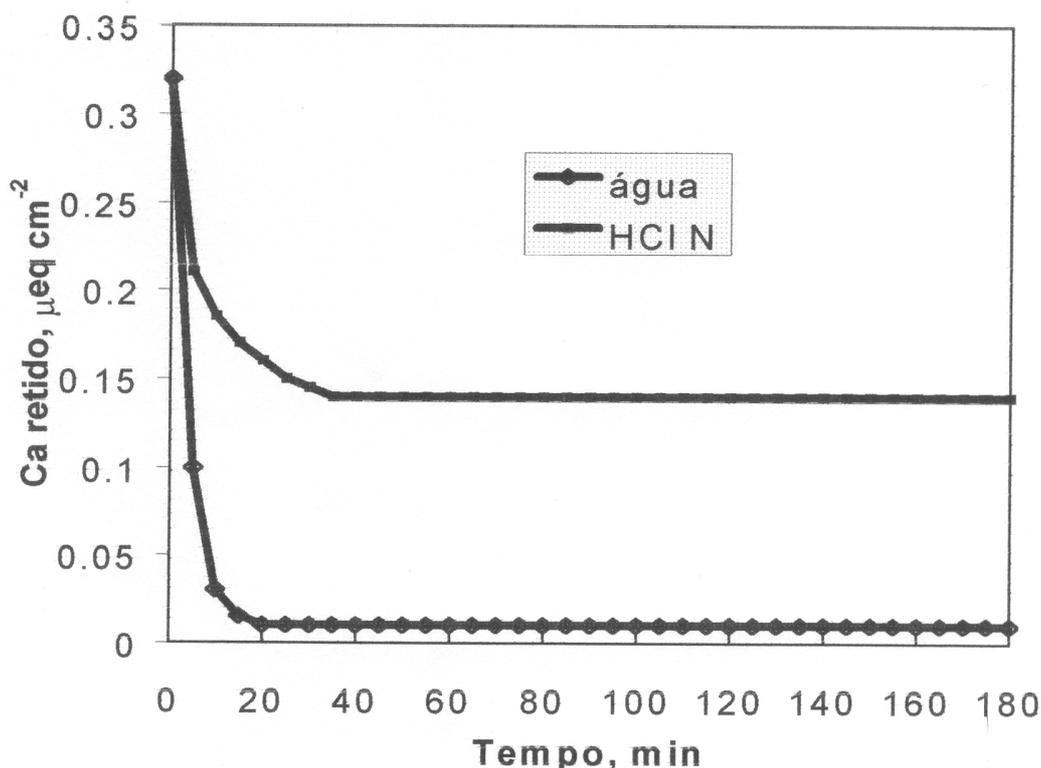


Figura 5: Retenção cuticular do Ca em cutículas de frutos de maçã em função da lavagem com água ou HClN.

A retenção cuticular aumentou bastante em pH mais alto (Figura 6), sugerindo um efeito do pH no número de cargas negativas na cutícula, que reagiu como um polieletrólito. Assim, a capacidade de troca da matriz cuticular depende fortemente do pH (Schönherr e Huber, 1977)

Também cobre, zinco e manganês, do mesmo modo que o cálcio, são retidos pelas cutículas de folhas de pera. A retenção depende do íon e decresce na ordem $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn}$. Quando a cutícula, inicialmente carregada com ^{65}Zn , ^{54}Mn ou ^{64}Cu , foram submetidas a lavagem, o ^{54}Mn foi praticamente todo recuperado no líquido de lavagem, enquanto apenas 40 % do ^{64}Cu foi perdido depois de 48 horas. O ^{65}Zn mostrou valores intermediários, da ordem de 80 %, após 48 horas de lavagem (Figura 7). O mesmo efeito foi observado em cutículas das faces adaxial e abaxial das folhas. Ademais, foi demonstrada interação de íons divalentes, de modo que o cobre reduziu drasticamente a retenção do zinco, revelando maior seletividade da matriz pelo Cu. Isso deve ser considerado na prática agrícola quando se aplica diversos elementos simultaneamente (Chamel e Gambonnet, 1982).

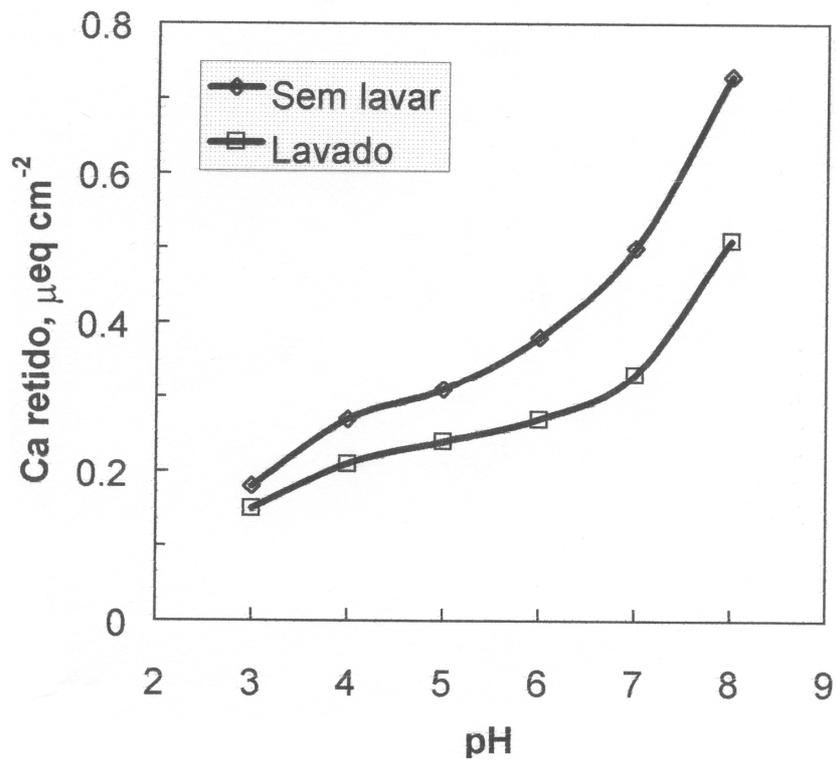


Figura 6: Retenção cuticular de cálcio em função do pH da solução.

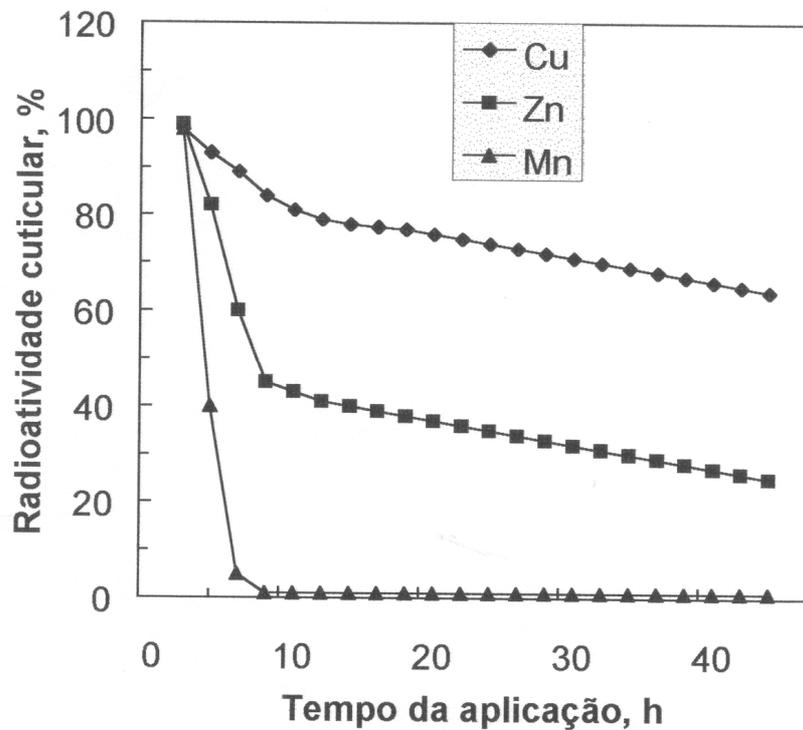


Figura 7: Efeito comparativo da lavagem com água na retenção cuticular de Cu, Zn e Mn.

Krüger (1999) mediu a difusão de Ca^{++} e NO_3^- através de cutículas sem estômatos e observou fluxos equivalentes, ou seja, para cada íon de Ca dois íons nitrato atravessaram a cutícula, de modo a manter o equilíbrio elétrico.

As ceras cuticulares associadas à cutina, são responsáveis pela primeira barreira à absorção de água e íons pelas folhas, e suas permeabilidades aumentam significativamente com a temperatura. Esta barreira está localizada na superfície externa da membrana cuticular.

1.6. PENETRAÇÃO VIA ESTÔMATOS

Por ter sido confirmada, sem sombra de dúvidas, muito recentemente, se conhece pouco dos mecanismos que regulam a penetração estomatal dos íons. Demonstrou-se que apenas uma pequena proporção dos mesmos, usualmente menos de 10 %, é atingida pela solução e participa ativamente da absorção mas, mesmo assim, a absorção está estreitamente correlacionada com o número de estômatos presentes (Figura 8). Além disso existe também estreita correlação da quantidade absorvida com o número de estômatos abertos (Figura 9). Por outro lado, quanto maior o número de reumidecimentos dos resíduos deixados na superfície foliar, maiores as taxas de absorção observadas (Eichert e Burkhardt, 2001).

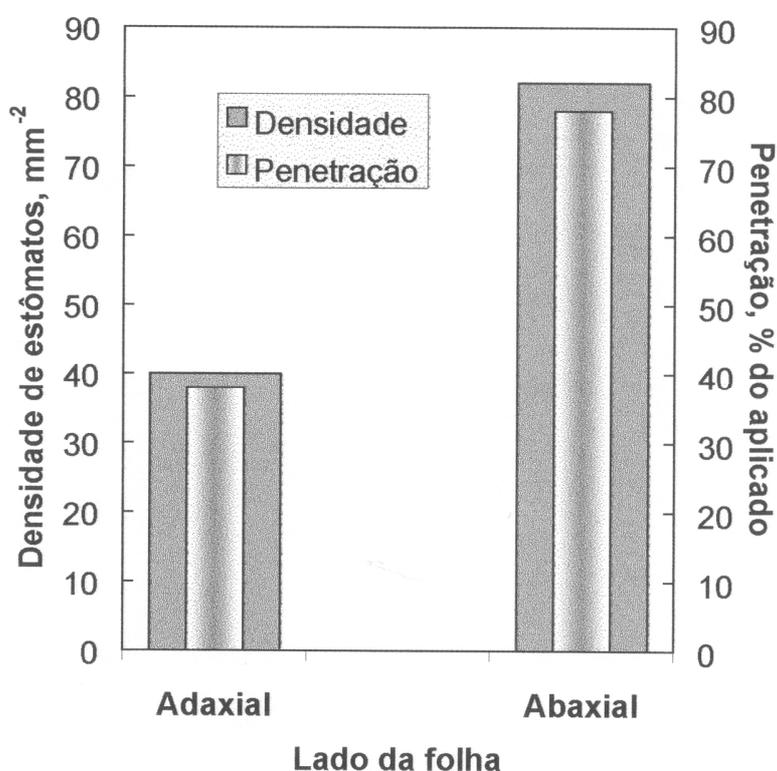


Figura 8: Efeito da densidade de estômatos na epiderme na absorção foliar.

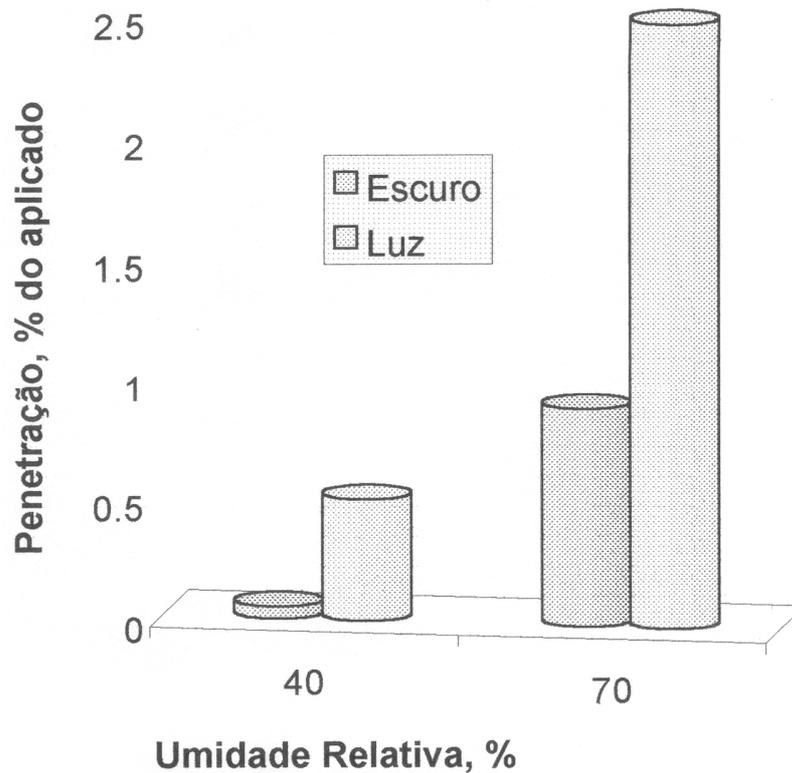


Figura 9: Efeito da quantidade de estômatos abertos e da umidade relativa do ar na absorção foliar. (Escuro – estômatos fechados).

Eichert e Burkhardt (2001) demonstraram ainda que a penetração via estomatal é um caminho não só para ânions grandes como uranina, mas também para pequenos íons como ferro, que são relevantes no caso da adubação foliar.

1.7. ABSORÇÃO FOLIAR E RADICULAR

Os processos de absorção via radicular e via foliar são bem parecidos (Gray, 1977, Malavolta, 1980), conforme pode ser visto na figura 10, uma vez que o principal passo é o transporte através da plasmalema (Mengel e Kirkby, 2001). Na referida figura pode ser visto que a velocidade de absorção de potássio por raiz de cevada e por folha de milho é semelhante para uma dada concentração do nutriente no meio externo, e além disso a velocidade máxima de absorção de K também são comparáveis. De modo análogo ao efeito da absorção radicular de nitrato e NH_4^+ no pH do meio nutritivo, o pH do apoplasto das folhas também é aumentado com absorção de nitrato e diminuído com absorção de amônio (Hoffman e Kosegarten, 1995).

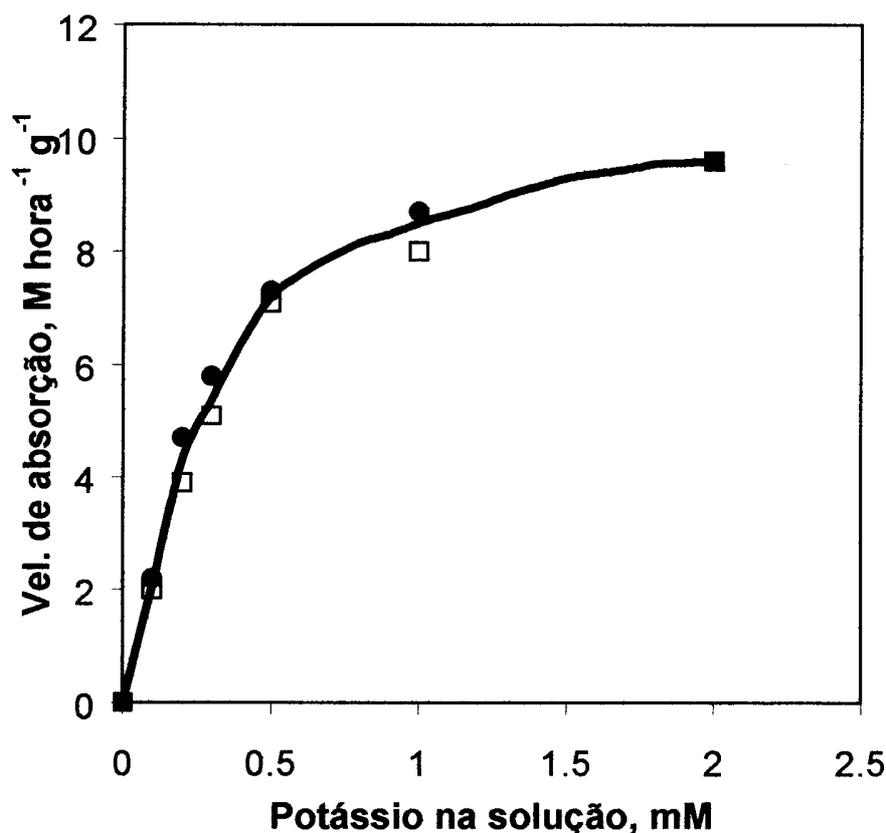


Figura 10: Absorção de potássio por raízes de cevada e folhas de milho.

Desta forma, a maior diferença a ser considerada entre a nutrição da planta por via radicular e foliar deve ser o meio no qual o órgão se encontra, além da superfície específica do órgão. As raízes são órgãos específicos para absorção de água e nutrientes, assim, sua superfície específica é muito maior que a das folhas. A taxa de absorção de nutrientes depende da concentração do mesmo no apoplasto das folhas, que é controlado principalmente pela taxa de difusão dos íons através da cutícula e pelo reservatório presente no filme de água sobre as folhas. Este provavelmente é um dos motivos limitantes da quantidade de nutrientes que se pode aplicar às folhas. Por outro lado, as raízes se encontram no solo e, uma vez em boas condições de umidade, deverão estar envolvidas pela solução do solo, onde também encontram-se os nutrientes em sua forma disponível. As principais características desta solução sob o ponto de vista da nutrição de plantas são: a) é uma solução diluída; b) está em equilíbrio. Assim, os nutrientes estarão disponíveis às plantas em baixas concentrações, continuamente. As folhas, via de regra, encontram-se em contato com a atmosfera. Na adubação foliar normalmente são fornecidos em concentrações relativamente altas, sendo que o veículo aquoso se evapora em pouco tempo. Desta forma, a absorção ocorre a partir de soluções muito concentradas.

Devido as estas diferenças, mais o grande número de fatores que pode influenciar a dinâmica do nutriente aplicado às folhas, é que são encontradas as maiores dificuldades em se equacionar os problemas inerentes à adubação foliar.

1.8. ABSORÇÃO PROPRIAMENTE DITA

Da mesma forma que a absorção radicular, a absorção foliar ocorre em duas fases: uma ativa e uma passiva.

Passiva - o elemento aplicado atravessa a cutícula, a parede celular e os espaços intercelulares, chegando à superfície externa do plasmalema, podendo se movimentar através do ectodesmata.

Ativa - o elemento atravessa o plasmalema, atingindo o citoplasma, e pode se acumular no vacúolo ou ser transportado para outras partes da planta. Esta fase da absorção é metabólica, despendendo energia, e pode ser inibida por venenos respiratórios (Blanco et al., 1972a). A exemplo do que ocorre na absorção radicular, a absorção foliar pode mostrar mecanismos duplos ou múltiplos de absorção (Bowen, 1969).

A fase passiva da absorção é reversível e sua velocidade e reversibilidade dependem das características da folha e do ambiente, ao passo que a fase ativa é um pouco mais demorada, mas irreversível.

A tabela 2 dá uma idéia geral da velocidade de absorção de nutrientes pela folha, mas é importante ressaltar que os valores são muito influenciados pela espécie de planta, pelo íon acompanhante e ainda por uma série de outros fatores.

Tabela 2: Velocidade de absorção foliar de nutrientes. (Compilado por Rosolem, 1984).

Nutriente	Tempo para 50 % de absorção
Nitrogênio	1 ½ - 36 horas
Fósforo	16 horas – 15 dias
Potássio	10 horas – 4 dias
Cálcio	2 – 4 horas
Magnésio	10 – 24 horas
Enxofre	16 horas – 4 dias
Cloro	1 – 4 dias
Ferro	10 – 20 dias
Manganês	1 – 2 dias
Molibdênio	10 – 20 dias
Zinco	1 – 2 dias

1.9. TRANSLOCAÇÃO DO NUTRIENTE ABSORVIDO

1.9.1. Transporte na folha

Na folha, os nutrientes podem ter dois caminhos antes de sua exportação para outros órgãos. O espaço livre entre as células forma um contínuo, a via apoplástica. Este espaço compreende de 3 a 5 % do volume total da folha. A Segunda via é o transporte simplástico, de célula para célula através do citoplasma e dos plasmodesmas.

O conhecimento sobre este transporte iônico é limitado, e a maioria dele é derivado do conhecimento sobre o transporte de fotoassimilados. Baseia-se na consideração de que o transporte para fora da folha de dá via floema. Os solutos, após atravessar o mesófilo, entram no apoplasto perto dos elementos crivados, e em seguida é transferido ao floema por um processo ativo (Franceschi e Giaquinta, 1983). Nutrientes como o nitrogênio e fósforo são rapidamente translocados dentro da folha, e normalmente seguem os padrões obtidos para os açúcares. O fosfato é translocado principalmente na forma inorgânica (Marshall e Wardlaw, 1973).

No caso do cálcio, o transporte intercelular em aveia é rápido, uma vez que, em 30 minutos ele estava distribuído por todo o mesófilo (Ringoet et al., 1971). Por outro lado, Millikan e Hanger (1969) determinaram que quando o Ca era aplicado à superfície foliar, o mesmo era imóvel, mas quando o nutriente era injetado no sistema vascular ele era rapidamente translocado.

O boro absorvido fica ligado a polissacarídeos da folha, sendo parcialmente móvel (Chamel e Eloy, 1983).

Quando se aplicou Fe, Mn ou Zn na ponta, no meio ou na base de folhas de milho, todos se movimentaram em direção à base da folha. Quando Kannan (1978) aplicou estes nutrientes de um lado da folha, não havia transporte para o outro lado da mesma (Figura 11).

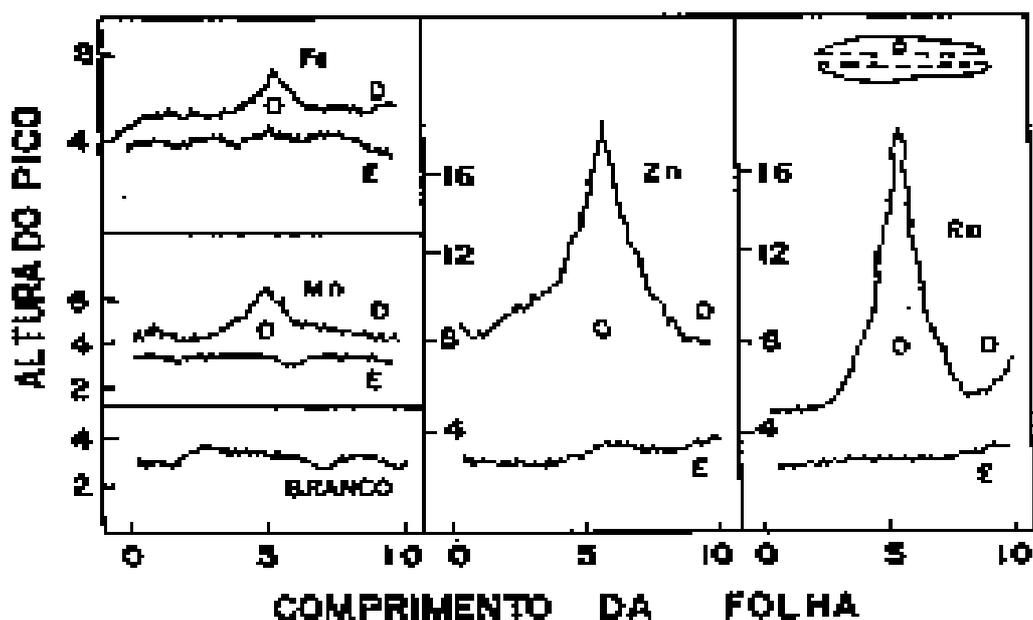


Figura 11: Movimento lateral de cátions em folhas de milho, 24 horas após a aplicação. O isótopo foi colocado nos locais marcados com círculos. D – lado direito das folhas, E – lado esquerdo da folha.

1.9.2. Transporte a longa distância

Tem sido aceita a classificação da tabela 3 com relação à mobilidade relativa dos nutrientes na planta. Entretanto, quando o nutriente é aplicado às folhas, nem sempre a classificação da tabela 3 se aplica, pois dependendo do nutriente, da forma como é aplicado, da espécie e do estado iônico interno da folha, a mobilidade será maior ou menor.

Um aspecto que não pode ser esquecido é que a velocidade de absorção não tem relação com a taxa de translocação. Por exemplo, o cálcio é rapidamente absorvido, mas não é translocado. A fonte do nutriente também tem efeito importante na relação entre absorção e translocação do nutriente.

Tabela 3: Classificação dos nutrientes quanto à sua mobilidade na planta.

Altamente móvel	Móvel	Parcialmente móvel	Imóvel
Nitrogênio	Fósforo	Molibdênio	Boro
Potássio	Cloro	Manganês	Cálcio
	Enxôfre	Zinco	
	Magnésio	Ferro	

Nitrogênio

O nitrogênio tem translocação bem rápida na planta, inclusive aquele aplicado por via foliar. O nutriente se movimenta através do floema, principalmente em formas orgânicas, sendo sua distribuição na planta uma função da demanda em cada órgão no momento da aplicação (Okano et al., 1983). Carvalho et al. (1983) observaram significativa translocação do N aplicado a folhas de cana-de-açúcar 6 horas após a aplicação. Entretanto, em algodão, Oosterhuis (2001) relata que a maioria do N absorvido pelo algodão só se transloca para o fruto mais próximo e não para outras partes da planta.

Em soja, Vasilas et al. (1980) mostraram recuperação de 70 % do nitrogênio aplicado via foliar à soja (Figura 12). Aos 20 dias após a aplicação o nutriente absorvido encontrava-se principalmente nas folhas e caule, entretanto com o passar do tempo, aproximadamente 95 % do N absorvido foi translocado para os grãos.

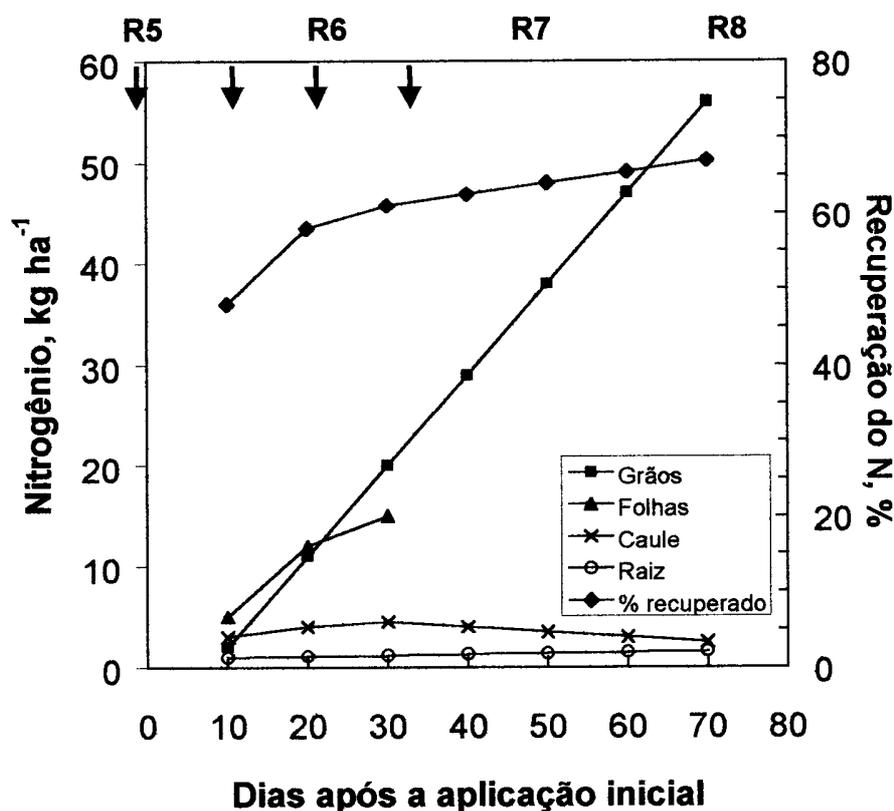


Figura 12: Efeito da aplicação de nitrogênio na absorção e redistribuição do nitrogênio em soja, durante a formação dos grãos. Foram realizadas 4 aplicações de 21 kg ha⁻¹ de N cada (flexas). O estágio fisiológico da planta é indicado por Rn.

Fósforo

No caso do fósforo foi demonstrado que existe translocação do P aplicado via foliar até as raízes de cafeeiro (Figura 13). Pela figura nota-se que menos de 50 % do nutriente aplicado foi absorvido em 2 horas, mas ao final de 1 hora já havia aproximadamente 10 % do P aplicado nos caules, e 2 horas após a aplicação aproximadamente 10 % do nutriente que havia sido absorvido já havia sido translocado para as raízes. Também em cana-de-açúcar foi demonstrada a translocação do P aplicado via foliar (Figura 14). Neste caso, considerando um tempo bem mais longo que o experimento anterior, ou seja, 5 semanas, nota-se a recuperação de pouco mais de 50 % do nutriente aplicado às folhas. Na primeira semana, todo o P absorvido estava nas folhas. A partir a segunda semana, uma boa parte foi translocada para os colmos, e a partir da terceira semana, praticamente 20 % do absorvido pelas folhas encontrava-se nas raízes.

Destes experimentos, fica claro: 1. A recuperação do P aplicado às folhas normalmente é menor que 60 %; 2. Há uma grande translocação do fósforo na planta, chegando até às raízes sem grandes dificuldades.

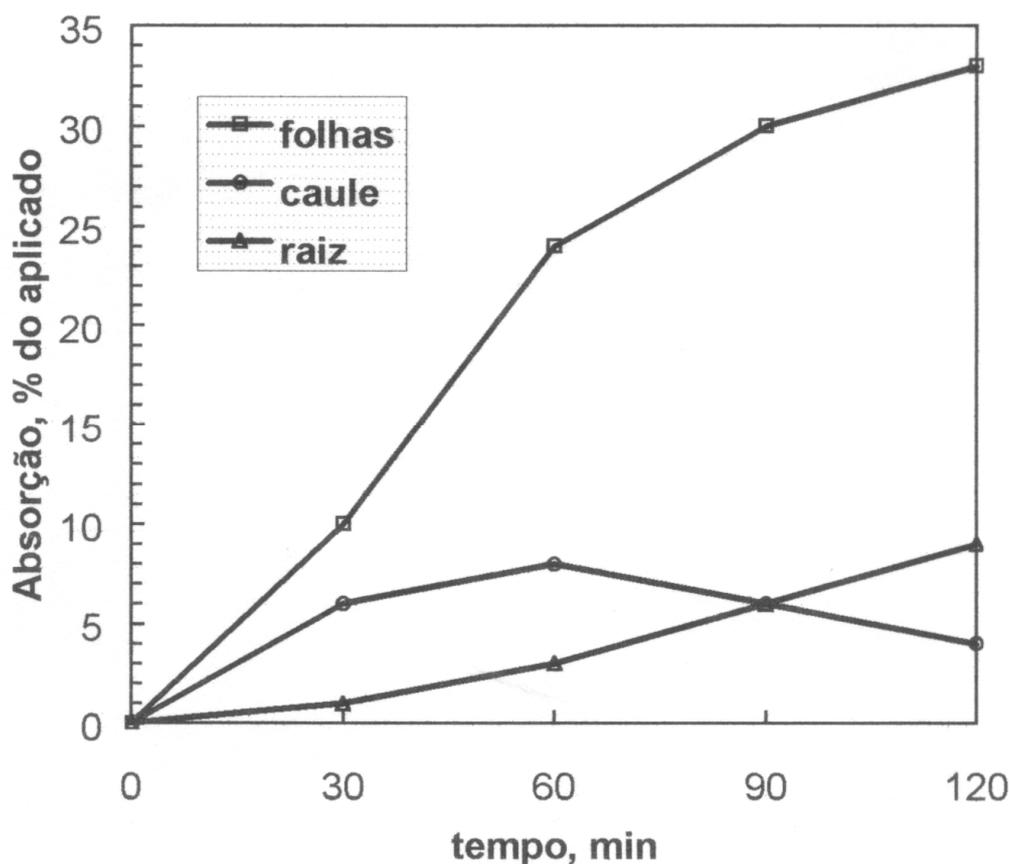


Figura 13: Absorção e transporte de fósforo aplicado às folhas cafeeiro.

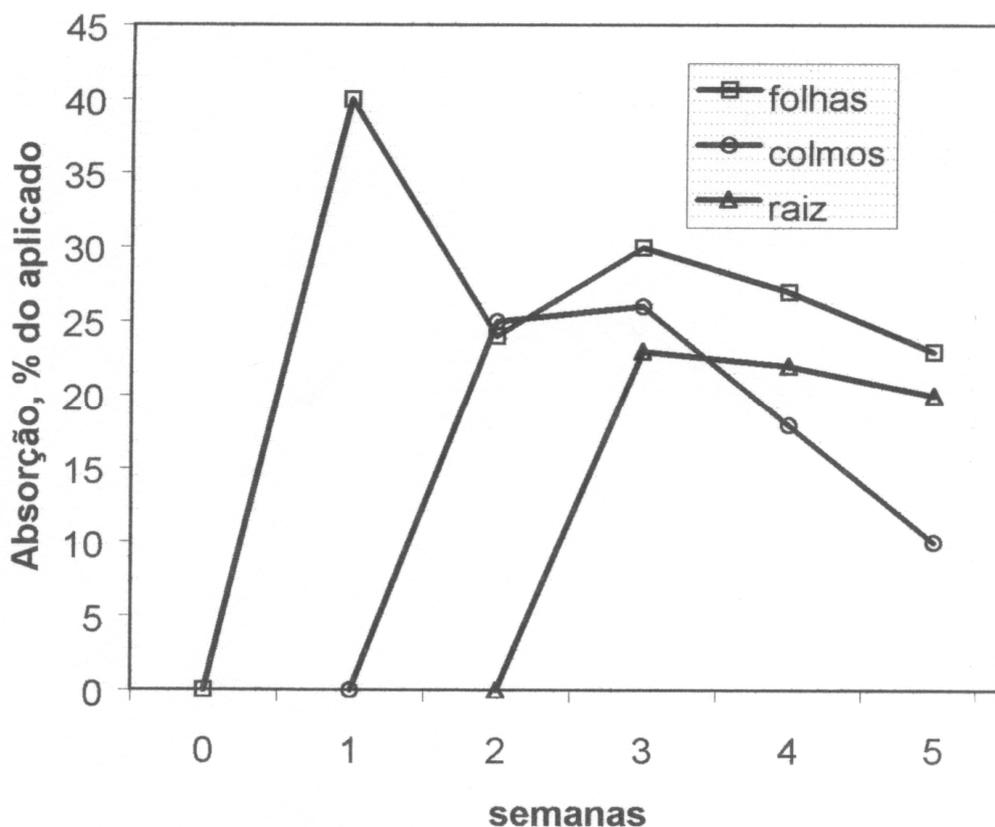


Figura 14: Absorção e translocação de fósforo aplicado às folhas de cana-de-açúcar.

Potássio

A translocação do potássio geralmente é rápida, mas depende do estado nutricional da planta. Chamel (1988) comenta que o K não sai das folhas quando aplicado à folhas deficientes.

Em cafeeiro foi demonstrado que o potássio aplicado às folhas é translocado para os frutos em formação (Figura 15). A translocação é tanto maior quanto maior for a dose do nutriente aplicado, na forma de KCl, até a concentração de 9,0 g K₂O L⁻¹. Desta forma, a translocação de K na planta não é limitante para a eficiência da aplicação foliar.

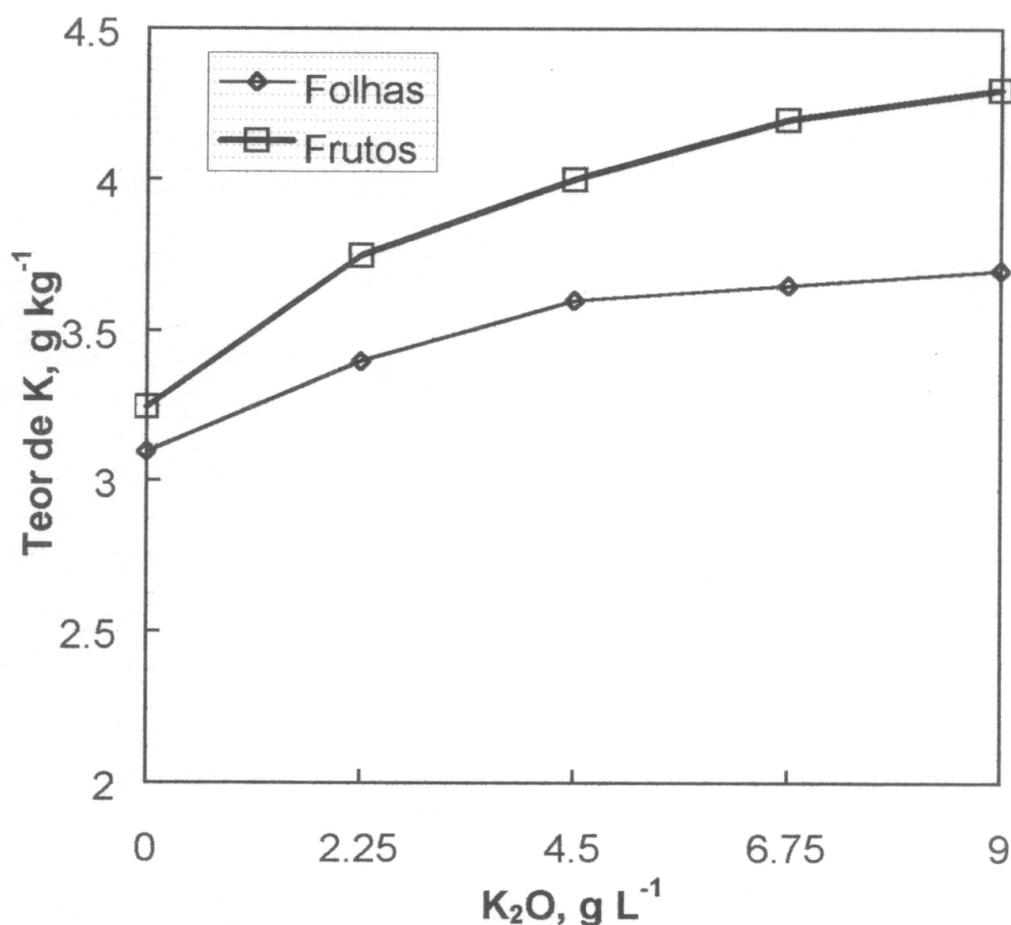


Figura 15: Absorção e transporte de potássio (como KC1) no cafeeiro.

A figura 16, de Shafer e Reed (1986) mostra a absorção e translocação do K de algumas fontes, após 48 horas. A translocação máxima foi de 13 % do aplicado. Dentre os compostos inorgânicos, foi obtido um coeficiente de correlação entre absorção e translocação de 0,90, mostrando que quanto maior a absorção maior a translocação. Para os compostos orgânicos não foi notada correlação significativa entre absorção e translocação.

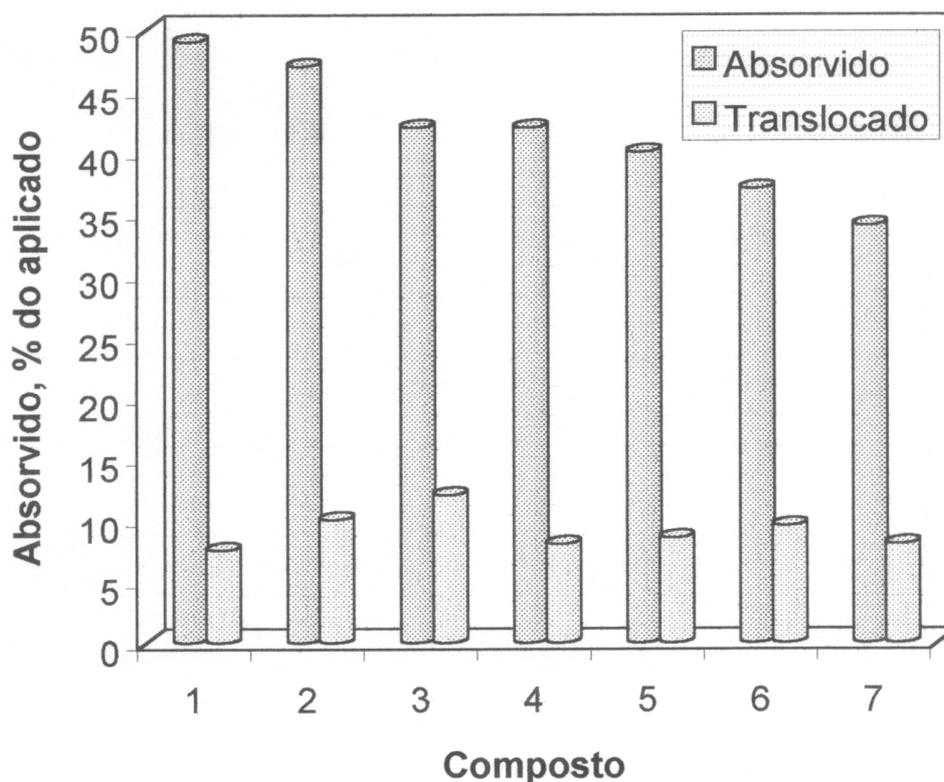


Figura 16: Absorção e translocação de potássio em função de fontes do nutriente: 1. Tioacetato; 2. Acetato; 3. Succinato; 4. Lactato; 5. Bicarbonato; 6. Nitrito; 7. Ortofosfato.

Usando $^{42}\text{KNO}_3$ aplicado à nervura central de folhas de algodoeiro, Kafkafi (1992), em Israel, mostrou que o K aplicado translocou-se para o resto das folhas e para as maçãs em desenvolvimento em 20 horas.

Cálcio

Boaretto et al. (1983a), demonstraram que a absorção de Ca via foliar pelo feijoeiro é bastante rápida. Entretanto não há translocação no nutriente para fora do órgão que recebeu a aplicação. Silva et al. (1997), quando aplicaram Ca na forma de cloreto ou quelatizado à folhagem de citros, não encontraram efeitos sobre os teores dos nutrientes nas folhas 90 dias após a aplicação.

Entretanto, apesar do Ca ser considerado imóvel na planta, se for aplicado em altíssimas concentrações, de modo a reverter o gradiente de concentração nas folhas, ele pode se movimentar para outros órgãos (Faust e Shear, 1973).

Magnésio

O magnésio, aplicado via foliar em citros como cloreto, ou mesmo quelatizado, não causou aumento nos teores do nutriente nas folhas, avaliados 90 dias após a aplicação (Silva et al., 1997).

Enxôfre

Muraoka e Neptune (1980) demonstraram, em feijoeiro, que o enxôfre é rapidamente absorvido e retranslocado na planta.

Boro

A mobilidade do boro nas plantas tem sido tradicionalmente admitida como dependente da corrente transpiratória, sendo o nutriente considerado como relativamente imóvel no floema (Gupta et al., 1985).

O boro é imóvel no floema do algodoeiro, fazendo com que uma deficiência temporária provoque prejuízo em apenas parte da planta. A correção da deficiência proporcionará crescimento normal apenas acima da região deficiente (Tabela 4). Deste modo, a folha recém-madura poderá não estar deficiente, mas regiões abaixo dela poderão ter perdido produção em função de uma deficiência anterior. Isso pode ocorrer quando se aplica boro via foliar, por exemplo. No exemplo da tabela 4 nota-se que tanto a aplicação de B à folhas mais novas como à folhas mais velhas do algodoeiro não conseguiram evitar os efeitos da deficiência, mostrando que realmente esta espécie não transloca o B absorvido via foliar.

Tabela 4. Altura de plantas de algodão em cultivo em solução nutritiva, em função de épocas de restrição de fornecimento de boro.

Aplicação de boro (em dias)			Altura das plantas			Estruturas reprodutivas
Até 30	30-45	45-60	30 dias	45 dias	60 dias	-- número ---
			----- cm -----			
+B sol ¹	-B sol	-B sol	54,4 a ²	56,6 b	59,0 d	0,0 d
+B sol	+B sol	+B sol	58,9 a	82,0 a	114,8 a	18,3 a
+B sol	+B fn	+B sol	56,6 a	57,1 b	71,8 c	3,9 c
+B sol	+B fv	+B sol	56,3 a	58,5 b	82,0 b	7,8 b
+B sol	-B sol	+B sol	55,8 a	57,8 b	71,6 c	4,4 c

¹ +Bsol: B presente na solução nutritiva; -Bsol: B ausente na solução nutritiva; +Bfn: B aplicado a folhas novas; +Bfv: B aplicado a folhas velhas.

² -Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (P<0,05).

Fonte: Rosolem & Costa (1998).

Chamel et al. (1981) determinaram que 78 a 93 % do boro estava na folha tratada após 24 horas da aplicação foliar. Entretanto Hanson (1991) demonstrou que há translocação do boro aplicado às folhas de espécies frutíferas decíduas (Figura 17). A aplicação foliar aumentou de 90 a 185 % o teor de B nas folhas 3 dias depois

do tratamento. Em aproximadamente 9 dias o nutriente havia sido exportado das folhas em direção às gemas mais próximas. O autor mostrou que a movimentação foi relativamente rápida (Figura 17), enquanto que os teores de B em folhas não tratadas não se modificou, sugerindo que o B aplicado não se liga a compostos orgânicos, o que lhe conferia mobilidade.

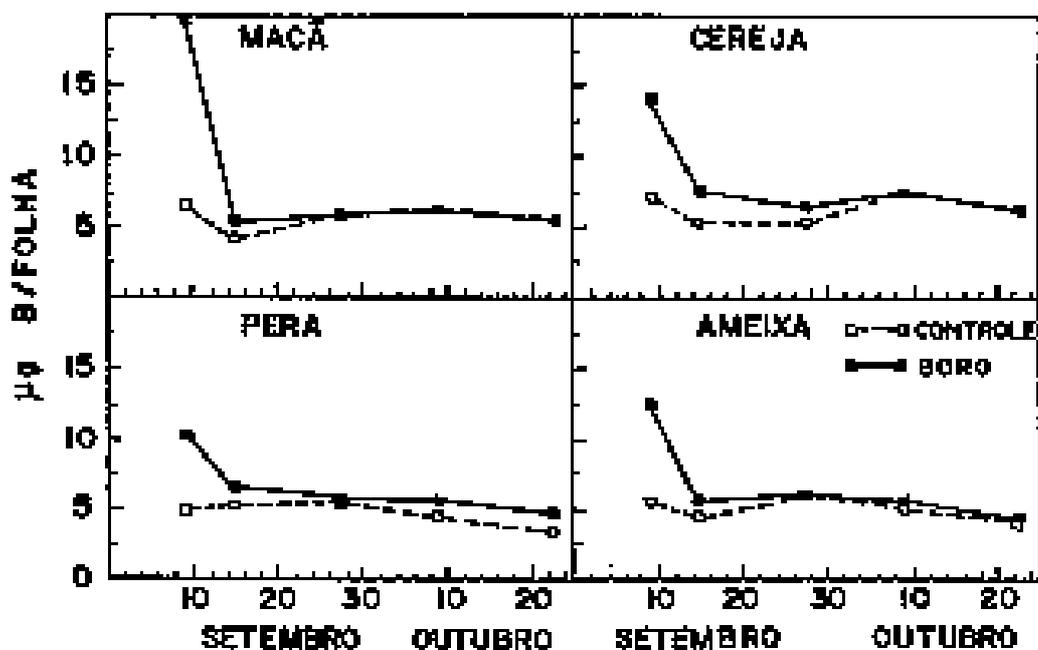


Figura 17: Evidência de translocação de boro em folhas de fruteiras decíduas.

Além de Hanson (1991), Shon e Blevins (1990) também verificaram efeito do boro em gemas. Em ambos os trabalhos os teores atingidos nas folhas tratadas foi bem superior ao considerado como nível crítico para toxidez sem o aparecimento de sintomas. É possível que o B aplicado ligue-se a polissacarídeos em folhas deficientes, ficando imóvel, enquanto que, em folhas não deficientes haveria mobilidade, a exemplo do potássio.

Entretanto, recentemente foi demonstrado que plantas que contêm quantidades apreciáveis de polióis (com cis-hidroxiilas), que se ligam ao boro, apresentam mobilidade do nutriente no floema (Figura 18), principalmente em seguida às aplicações foliares (Brown e Hu, 1996). Na figura é possível observar que, tanto o teor muito alto de B, como o nutriente que foi translocado, vieram da aplicação foliar, uma vez que o teor de B que já se encontrava na planta não foi modificado. A soja, por exemplo, contém grandes quantidades da molécula cis-diol pinitol (Phillips & Smith, 1974), o que pode resultar em mobilidade do boro no floema.

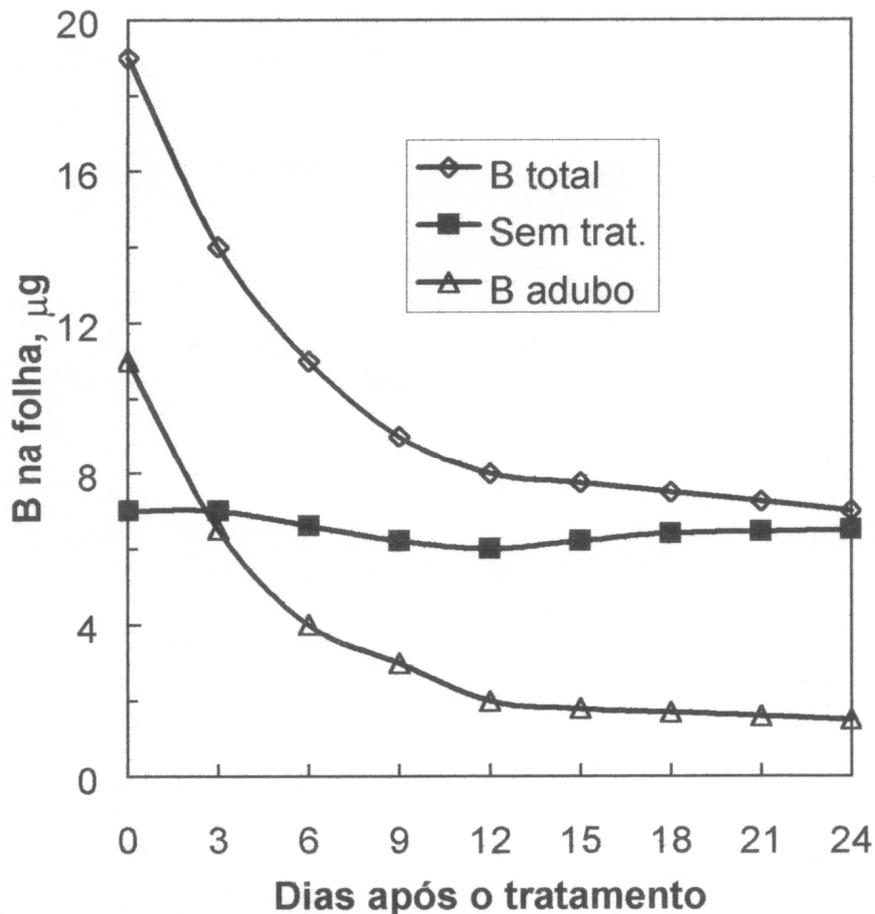


Figura 18: Translocação do boro em folhas de macieira.

Cobre

Não foram encontrados, na literatura consultada, resultados conclusivos sobre a translocação do cobre aplicado via foliar.

Manganês

Ferrandon e Chamel (1988) demonstraram que o $MnSO_4$ é absorvido em proporção maior que o Mn-EDTA, embora a translocação nesta última forma tenha sido bem mais eficiente. Entretanto, Boaretto et al. (2000) observou que, 30 dias após a aplicação, menos de 4 % do Mn aplicado às folhas de citros havia sido translocado para fora das folhas que receberam o nutriente.

Molibdênio

Pessoa et al. (2001) estudaram a resposta do feijoeiro à adubação foliar com molibdênio. Tanto a atividade da Redutase de Nitrato, nas folhas (Figura 19), como da Nitrogenase, nos nódulos (Figura 20), responderam a doses de Mo aplicado via foliar até a dose de 40 g ha^{-1} . Isso mostra claramente que o nutriente aplicado via

foliar foi translocado até as raízes e aproveitado pelas bactérias em simbiose. Assim, apesar de tido como nutriente de pouca mobilidade na planta, o Mo pode ser aplicado via foliar, com bons resultados, uma vez que sua redistribuição na planta é boa.

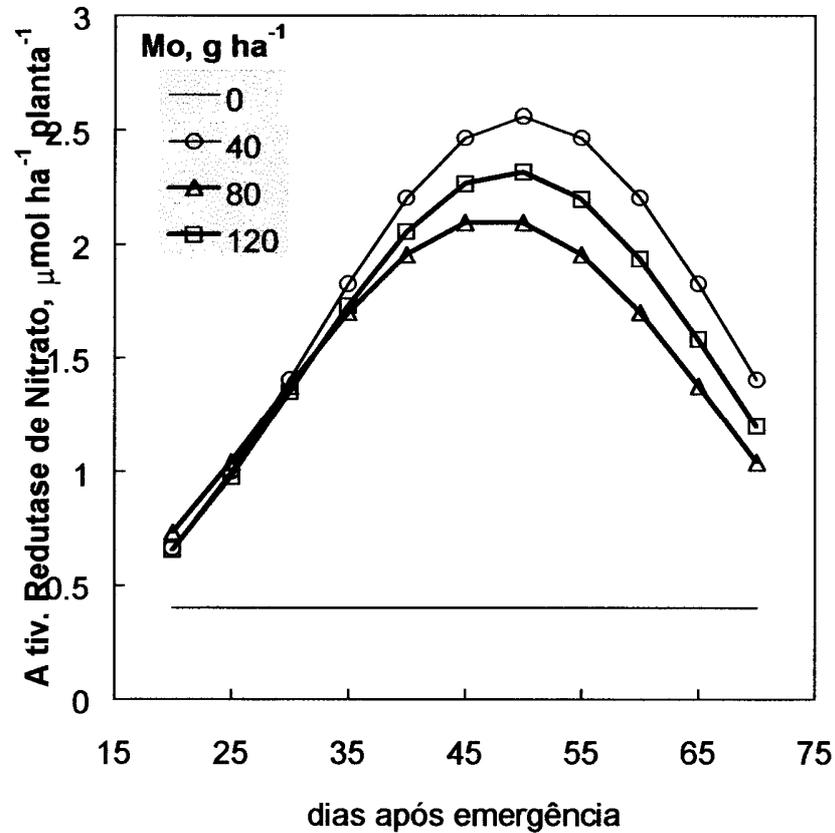


Figura 19: Atividade de redutase de nitrato em folhas de feijoeiro em função da aplicação foliar de molibdênio e da idade da planta.

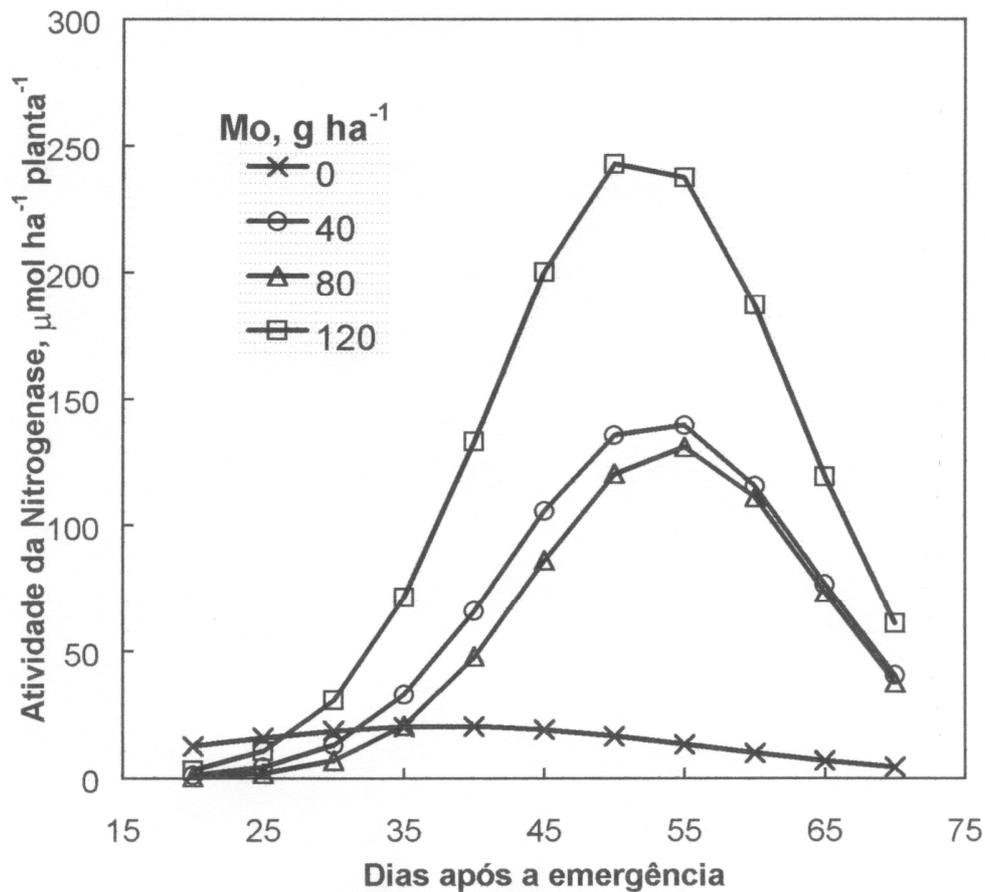


Figura 20: Atividade da nitrogenase em nódulos de feijoeiro em função de doses de Mo e da idade da planta.

Zinco

Em cafeeiro, Sacramento e Rosolem (2000), demonstraram que, 4 a 5 dias depois da aplicação de zinco, houve translocação do nutriente apenas para partes mais novas das plantas, o Zn translocado estava nos cloroplastos e nas frações subcelulares, mas não na parede celular (Figura 21). Esta é uma evidência de translocação pelo xilema, uma vez que, se estivesse no floema, o Zn deveria ser também translocado para as raízes, o que não foi observado. Não houve evidência de translocação para partes mais velhas das plantas e, além disso, o Zn formulado com quelados apresentou translocação superior ao sulfato. Em trabalho de campo, Rosolem e Sacramento (2001), observaram, tanto em café, 29 e 150 dias após a aplicação (Figura 22) como em citros (limoeiro e laranja), 150 e 240 dias após a aplicação (Figura 23), maiores teores de Zn no crescimento que ocorreu após a aplicação dos produtos, numa evidente demonstração de translocação do nutriente para os pontos de crescimento. Não houve diferenças na translocação quando foi usado sulfato, ligossulfonado ou EDTA como fonte do nutriente.

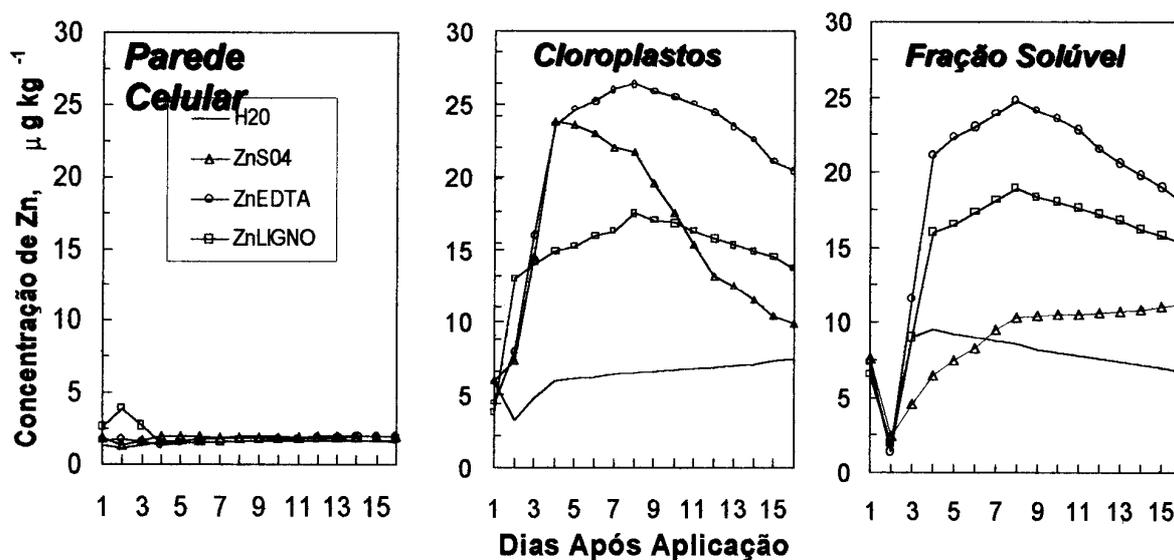


Figura 21: Zinco na parede celular, cloroplastos e fração solúvel em partes das plantas de café acima das folhas tratadas.

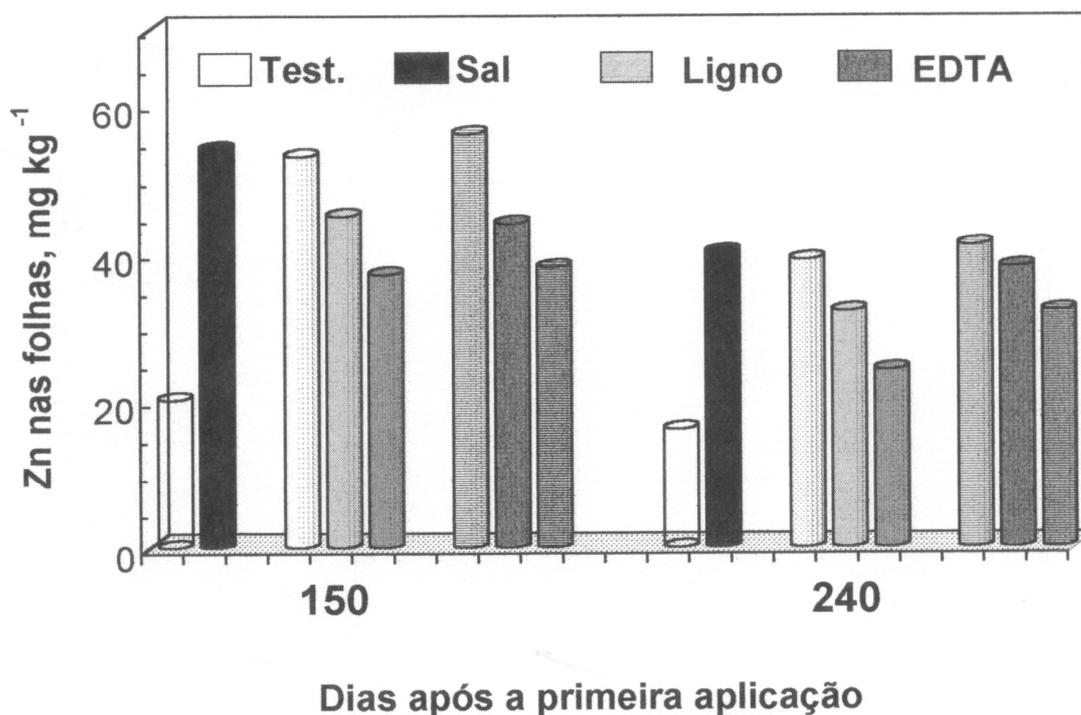


Figura 22: Teores de Zn em folhas de cafeeiro em função da fonte do nutriente e de épocas de amostragem. Em função da época de amostragem, as folhas coletadas não haviam recebido aplicação foliar, tendo-se portanto evidência de translocação do nutriente. Média de 2 locais.

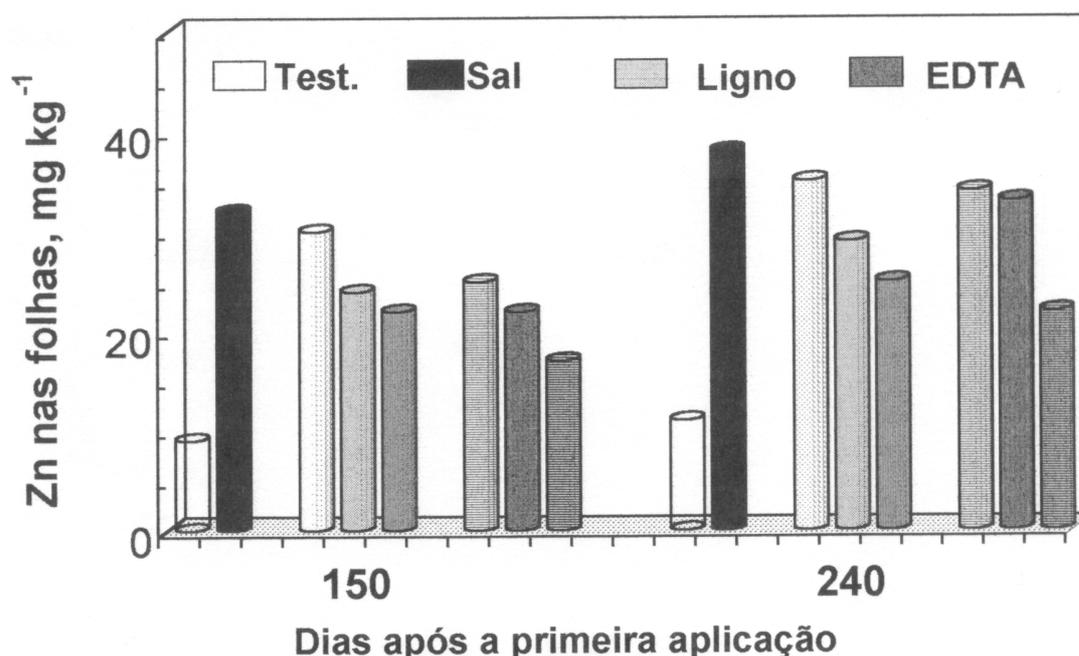


Figura 23: Teores de Zn em folhas de citros em função da fonte do nutriente e de épocas de amostragem. Em função da época de amostragem, as folhas coletadas não haviam recebido aplicação foliar, tendo-se portanto evidências de translocação do nutriente. Média de um pomar de limoeiros e um de laranjeiras.

Em algodoeiro, Ashmead (1997) observou pouquíssima translocação do zinco quelado com aminoácido aplicado às folhas 24 horas depois da pulverização. Praticamente todo o nutriente encontrava-se no local de aplicação. Entretanto, 120 horas após, tinha ocorrido alguma translocação para o ponto de crescimento, ou seja, a gema apical da planta.

Pelos resultados discutidos, parece haver sim, alguma translocação do Zn. Entretanto, a translocação somente ocorre em direção aos pontos de crescimento.

1.10. FATORES QUE INFLUENCIAM A ABSORÇÃO FOLIAR

Em função do meio em que as folhas se encontram, uma série de fatores pode influenciar positiva ou negativamente tanto a absorção como a translocação do nutriente para outras partes da planta. Assim, existem características inerentes à própria folha (fatores intrínsecos) ou independentes da folha (fatores extrínsecos) que modificam esses processos.

1.10.1. Fatores Intrínsecos

1.10.1.1. Permeabilidade da cutícula

Diferenças entre as eficiências de absorção foliar de diferentes espécies têm sido explicadas através das diferenças na espessura da cutícula, quantidade e qualidade da cera na sua superfície e capacidade da cutícula em se umidecer (Leece, 1976). Em função da maior ou menor espessura da cutícula, do número de estômatos e da presença ou não de pilosidade, podem ocorrer diferenças na absorção de nutrientes pelas faces dorsal e ventral da folha (Kannan, 1980, Malavolta, 1980), conforme é ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5: Absorção de radiofósforo pelo cafeeiro novo em função do método de aplicação.

Parte tratada	Absorção relativa		Atividade absorvida % da fornecida
	Raíz=100		
Raízes	100		5,0
Folhas	Página superior	185	12,0
	Página inferior	646	42,6
	Ambas	313	20,5

No caso da Tabela 5 a maior absorção pela página inferior foi justificada em função do maior número de estômatos no local. Entretanto é importante lembrar que, no cafeeiro, a página inferior da folha tem menos cerosidade. A tabela mostra ainda que a absorção de P foi muito mais eficiente pelas folhas que pelo sistema radicular.

Para haver uma boa taxa de absorção é necessário que a cutícula esteja hidratada, o que, além de melhorar a permeabilidade da mesma, permite a abertura das células guarda, predispondo os estômatos à absorção de nutrientes. A utilização de formulações oleosas pode também facilitar o processo.

Folhas de milho são 10 vezes mais eficientes na absorção de manganês que as folhas de citros, pois absorveram 71 % do nutriente aplicado, enquanto que folhas de citros absorveram apenas 7 % (Boaretto et al., 2000). Este resultado pode estar ligado ao tipo de cutícula que cada uma das espécies apresenta.

1.10.1.2. Idade da folha

Quanto mais velha a folha, menor a absorção de nutrientes, seja em função da estrutura e composição da cutícula, seja em função da menor atividade metabólica (Camargo e Silva, 1975). Por outro lado, substâncias lipoidais podem ser absorvidas mais facilmente por folhas velhas, dada a maior quantidade de ceras e cutina em sua cutícula, além do maior grau de polimerização da cutina.

1.10.1.3. Estado iônico interno

De acordo com Malavolta (1980), a capacidade de absorção foliar pode ser limitada pela quantidade de nutriente já contida na folha, uma vez que plantas deficientes em um elemento o absorvem com maior velocidade que plantas bem nutridas. Por outro lado, um alto nível do nutriente no sistema vascular pode retardar o transporte do mesmo a partir das folhas, causando a saturação do processo. Recentemente, Rosolem e Franco (2000) demonstraram que a translocação de Zn de folhas de milho para as raízes foi muito maior em plantas bem nutridas em zinco (Figura 24).

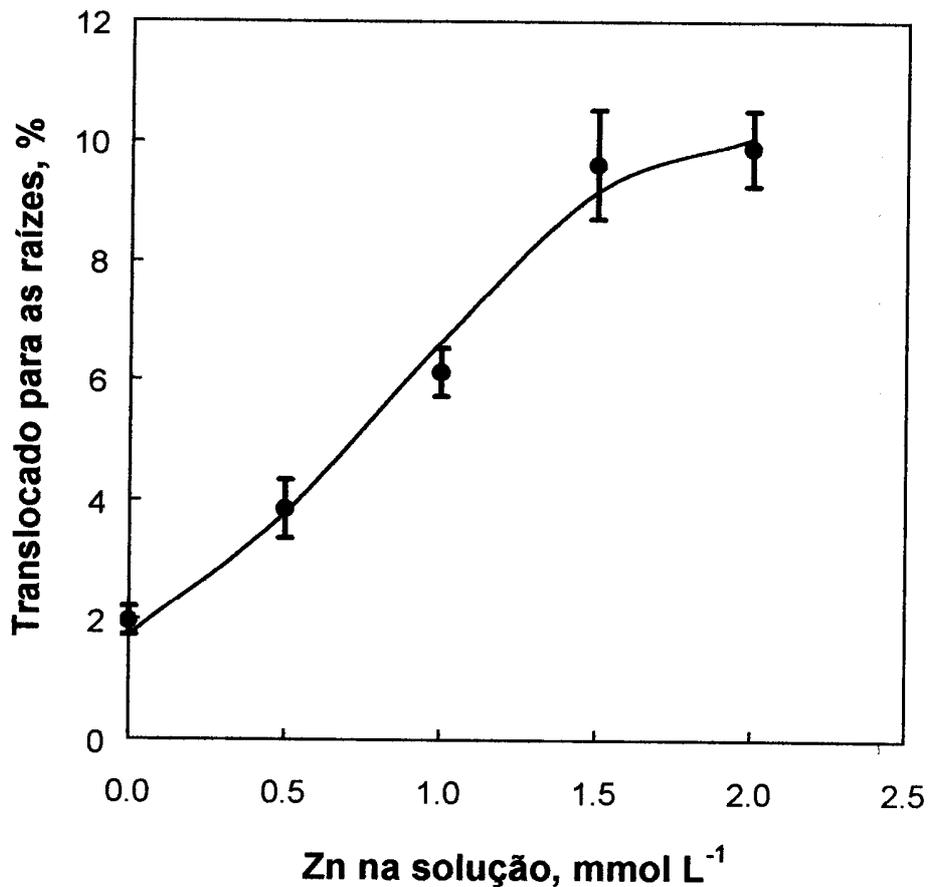


Figura 24: Proporção de Zn nas raízes de milho, oriundo do nutriente aplicado nas folhas, em função do estado nutricional da planta.

- Via de assimilação de carbono

Luttge et al. (1971) observaram que havia diferença a absorção de cloreto entre plantas C₃ e C₄, quando era variada a intensidade luminosa. Desta forma a presença de luz sempre estimulou a absorção de plantas C₄, mas as plantas C₃ mostraram resposta variável, dependendo do estado fisiológico das folhas. O autores relatam ainda que nas plantas C₄ a absorção depende de outra fonte de energia, além do ATP.

- Estádio fisiológico da cultura

Em função do tipo de adubação foliar a ser empregada, pode ser muito importante a época de aplicação do adubo. Por exemplo, Machado et al. (1982) notaram que o feijoeiro somente respondeu à adubação foliar com nitrogênio quando foram feitas 2 aplicações, aos 30 e 45 dias após a emergência das plantas, tanto na safra das águas como na safra da seca, e ainda, que tal efeito foi devido ao maior número de grãos desenvolvidos por vagem. Aplicações mais tardias de nitrogênio levaram a um aumento no peso de 100 sementes, mas não proporcionaram maiores produtividades. Por sua vez, Lorenzetti e Coleti (1981) obtiveram bons resultados com a adubação foliar da cana-de-açúcar no período de novembro a março, época em que o crescimento da cultura é muito rápido. Oosterhuis (2001) observou que, na primeira semana do florescimento, o algodoeiro absorveu 60 % do nitrogênio aplicado às folhas, proporção que caiu para 40 % a partir da terceira semana do florescimento.

1.10.2. Fatores Externos

- Nutriente

Considerando as diferentes velocidades de absorção dos nutrientes, o grau e localização de metabolização do mesmo, e o efeito do estado iônico interno da folha, pode-se perceber que, dependendo do nutriente a ser aplicado, sua absorção será menor ou maior, dependendo dos fatores citados. Desta forma Alston (1979) recuperou nas folhas de 13 a 14 % do fósforo aplicado, ao passo que a recuperação do nitrogênio chegou a 97 % do aplicado. Por outro lado, Boaretto et al. (1983b) recuperaram 50 % do fósforo e do enxofre aplicados às folhas do feijoeiro. Há ainda que se considerar as possíveis interações que ocorrem, que podem ser positivas ou negativas, ou sinérgicas e antagônicas. Como exemplo de interações positivas podem ser citadas: N-Zn, Mn-Zn, Zn-Cl, e como antagônicas: Mn-N, Mn-Cu, Na-Cu, Zn-B, (Camargo e Silva, 1975; Malavolta, 1980; Garcia et al., 1980). Na figura 25 encontram-se exemplos de antagonismos.

A mobilidade do nutriente na planta, aliado a seu ponto de ação fisiológica, pode ser outro fator bastante limitante na eficiência da aplicação foliar do mesmo.

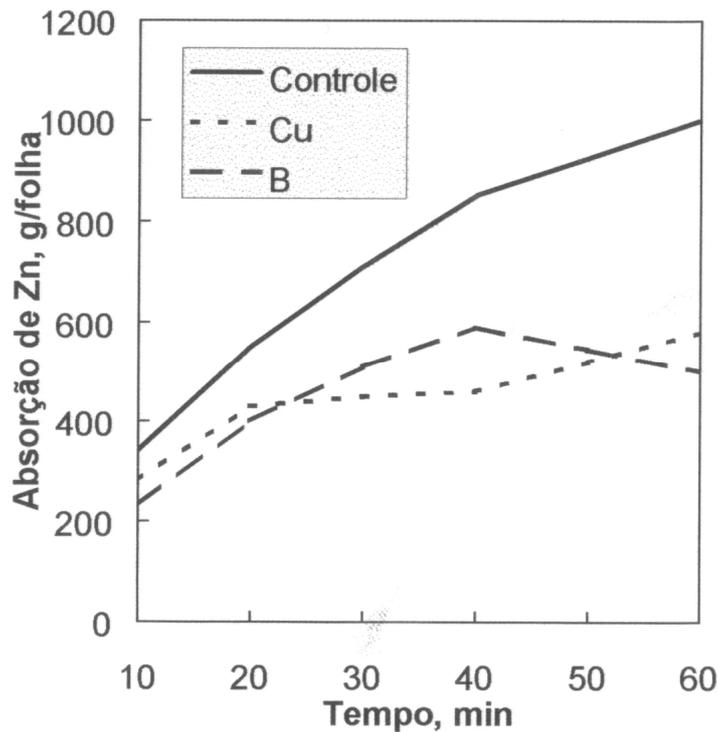


Figura 25: Efeito do boro e do cobre na absorção foliar de zinco pelo cafeeiro.

- Fonte do nutriente

O íon acompanhante do elemento no sal pode ter grande influência, seja na absorção do nutriente, seja na tolerância da planta à aplicação foliar.

- Nitrogênio

Malavolta (1980) relata que a absorção do N-amídico é mais rápida do que a do N nítrico, que por sua vez supera a do N amoniacal, de modo que a alta velocidade de absorção da uréia pode provocar toxidez em função da atividade da urease na folha. Por outro lado, Boaretto et al. (1983b) observaram que o feijoeiro tolera a aplicação de soluções mais concentradas de uréia, sulfato de amônio MAP e DAP do que de nitrato de amônio. Entretanto, Carvalho et al. (1983) levantaram a hipótese da ocorrência de perdas de uréia por volatilização.

A uréia tem sido a fonte de N mais utilizada. Suas vantagens compreendem o alto teor de nitrogênio, podendo ser utilizada em concentrações altas sem ser fitotóxica. A uréia é absorvida, metabolizada e translocada rapidamente (Klein e Weinbaum, 1984).

- Fósforo

Silberstein e Wittwer (1951) demonstraram que H_3PO_4 é absorvido mais rapidamente que outros compostos orgânicos e inorgânicos, resultados que foram

confirmados por Yogaratnan et al. (1981), em folhas de macieira. Dos trabalhos de Torman et al. (1969); Datta e Vyas (1966), Malavolta et al. (1979, 1981) pode-se concluir que os fosfatos apresentam a seguinte ordem decrescente de eficiência de absorção: ácido fosfórico = DAP = MAP = fosfato de potássio > fosfato monocálcico > fosfato bicálcico > superfosfato. Nas tabelas 6 e 7 encontram-se resultados obtidos por Barel e Black (1979a), onde são mostradas diferenças na tolerância e eficiência de absorção de fósforo por folhas de milho e soja, em função da fonte do nutriente. Apesar do ortofosfato ser relativamente mais absorvido tanto no milho como na soja, no caso da soja sua translocação foi mínima. Segundo os autores, o tempo decorrido na hidrólise dos fosfatos condensados para ortofosfato aparentemente permite a translocação de parte do fósforo, aumentando a tolerância a altas concentrações. As soluções neutras de tri e tetra-polifosfatos de amônio demoram para secar e se cristalizar. Durante este tempo a absorção de P persiste. Por outro lado, a solução neutra de sais de amônio do ácido fosfórico seca rapidamente, deixando na superfície da folha um resíduo seco branco.

Tabela 6: Máxima quantidade de fósforo tolerada por folhas de milho e soja, em função da fonte do nutriente.

Fonte de fósforo*	Máxima tolerância ($\mu\text{g P cm}^{-2}$)	
	Milho	Soja
Ortofosfato	120	80
Pirofosfato	220	160
Tripolifosfato	370	220
Tetrapolifosfato	370	280
Tetrametafosfato	400	280
Fosforil triamida	340	80
Hexamida fosfonitrilica	190	340

* As diferentes fontes de P foram aplicadas na forma de amônio a pH 7,0.

Tabela 7: Teores de fósforo tolerada em folhas jovens de milho e soja, em função da fonte do nutriente.

Fonte de fósforo*	P na folha (g kg ⁻¹)	
	Milho	Soja
Sem fósforo	3,2	3,7
Ortofosfato	3,4	4,1
Triplifosfato	3,5	4,0
Tetrapolifosfato	3,3	4,1
Trimetafosfato	3,4	4,1
Tetrametafosfato	3,3	4,1

*As diferentes fontes de P foram aplicadas na forma de amônio a pH 7,0.

Entretanto, a maior tolerância a uma determinada fonte do nutriente não significa necessariamente mais eficiência, o que pode ser observado comparando-se os resultados das tabelas 6 e 7. Dependendo da fonte do nutriente que foi empregada, foram recuperados na planta mais de 90 % da quantidade aplicada (Barel e Black, 1979b).

Ainda, a absorção de diferentes fosfatos se relaciona com a solubilidade e higroscopicidade do sal. Desta forma, embora não existam informações com a segurança desejada, devem ser utilizadas fontes de nutrientes com baixo índice salino, procurando-se minimizar o dano às folhas. Na tabela 8 encontra-se uma relação de alguns materiais, com seu respectivo índice salino. É desejável ainda uma alta solubilidade, o que permitirá a aplicação de volumes menores de solução. É fundamental que o material apresente alta pureza, procurando-se evitar possíveis efeitos adversos.

Tabela 8: Índice salino de alguns materiais fertilizantes.

Material	Análise	Índice salino	
		Por peso do adubo NaNO ₃ = 100	Por 1% do nutriente
Nitrato de Amônio	35 % de N	104,7	2,99
Sulfato de amônio	21 % de N	69,0	3,25
Nitrato de cálcio	16 % de N	65,0	4,19
Nitrato de sodio	17 % de N	100,0	6,06
Uréia	46 % de N	75,4	1,62
Superfosfato triplo	45 % de P ₂ O ₅	10,1	0,22
Monoamônio fosfato	12 % de N	29,9	0,41
	62 % de P ₂ O ₅		
Diamônio fosfato	21 % de N	34,2	0,46
	54 % de P ₂ O ₅		
Cloreto de potássio	60 5 de K ₂ O	116,3	1,94
Nitrato de potássio	14 % de N	73,6	1,22
	47 % de K ₂ O		
Sulfato de potássio	% de S	46,1	0,85
	54 % de K ₂ O		
Monopotássio fosfato	52 % de P ₂ O ₅	8,4	0,10
	35 % de K ₂ O		

- Potássio

Com relação ao potássio, Neptune et al. (1961) não encontraram diferenças na absorção de nitrato, cloreto e sulfato, sendo ainda usados fosfatos. De acordo com Chamel (1988), a ordem decrescente de absorção de sais potássicos é a seguinte: K₂CO₃ > KCl – KNO₃ – KH₂PO₄ > K₂SO₄. A ordem obedece à ordem de solubilidade em água e às propriedades higroscópicas dos sais. Entretanto, segundo Shafer e Reed (1986), considerando-se sais potássicos de fósforo, sulfato, nitrato e cloreto, a absorção se correlaciona bem com a solubilidade, mas a correlação é negativa (Tabela 9). Entretanto, entre os diversos sais com enxofre ou com fósforo, há correlação negativa com o peso molecular e não com a solubilidade (Tabela 10). Dentre as fontes orgânicas de K, existe correlação negativa com o peso molecular dos compostos (Tabela 11). Assim, compostos orgânicos de K com peso molecular baixo foram mais eficientes que os compostos inorgânicos.

Tabela 9: Absorção total de K (³⁶Rb) por folhas de soja de compostos inorgânicos, após 48 h da aplicação.

Composto	Absorvido	Peso Molecular	Solubilidade
	%		
Ortofosfato	28	182,5	-
Sulfato	4	267,1	42,4
Nitrato	4	147,5	44,3
Cloreto	4	120,9	77,0
Coef. De correlação	-	0,03	- 0,99

Tabela 10: Absorção total de K (³⁶Rb) de fontes inorgânicas de potássio por folhas de soja.

Composto	Absorvido	Peso Molecular	Solubilidade
Compostos de S	%		
Tiosulfato	9,5	190,4	96,1
Sulfato	8,8	174,3	11,1
Sulfito	8,4	119,2	107,0
Persulfato	1,5	270,4	-
Coef. Correlação	-	- 0,81	0,05
Compostos com P			
Ortofosfato	34,4	135,1	96,1
Pirofosfato	22,5	216,2	S
Metafosfato	18,1	292,2	S
Trifosfato	13,5	448,5	-
Polifosfato	0,8	-	-
Coef. Correlação		- 0,78	-

Tabela 11: Absorção total de K (³⁶Rb) de fontes orgânicas de potássio por folhas de soja.

Composto	Absorvido	Peso molecular	Solubilidade
	%		
Tioacetato	48	114	S
Acetato	47	98	256
Formato	46	84	331
Succinato	43	194	S
Malato	35	210	S
Propionato	34	150	59
Piruvato	18	126	S
Aspartato	13	196	S
Citrato	12	268	167
Glutamato	11	210	S
Coef. Correlação	-	- 0,87	-

- Cálcio

As fontes de cálcio mais utilizadas são $\text{Ca}(\text{NO}_3)$, CaCl_2 , mais algumas fontes quelatizadas, com EDTA ou ácido polifenólico. Bremer et al. (1986), demonstrou que o Ca quelatizado proporcionou melhores resultados no controle de “bitter pit” em maçã que os sais, e ainda melhorou as condições dos frutos após o armazenamento.

Krüger (1999) observou que as taxas de difusão de Ca através de cutículas sem estômatos decresceram na seguinte ordem: cloreto > nitrato > acetato > propionato, assim como os coeficientes de permeabilidade da cutícula a estes sais. Mais recentemente ainda Schönherr (2001) observou, em cutículas sem estômatos, isoladas de frutos de macieira, que o cloreto e o nitrato mostraram constantes de taxa de penetração semelhantes entre si, mas bem maiores que o propionato, lactato e acetato (Figura 26). O mesmo autor notou ainda que a constante de taxa de penetração cuticular do Ca-EDTA era bem menor que da do Ca-cloreto. Estes resultados, ou seja, boa penetração do cloreto de cálcio parecem em discordância com os resultados de retenção cuticular apresentados por Chamel (1988), entretanto, neste caso foi usado um surfactante (Glucopn 215 CSUP), que minimizou o efeito de retenção.

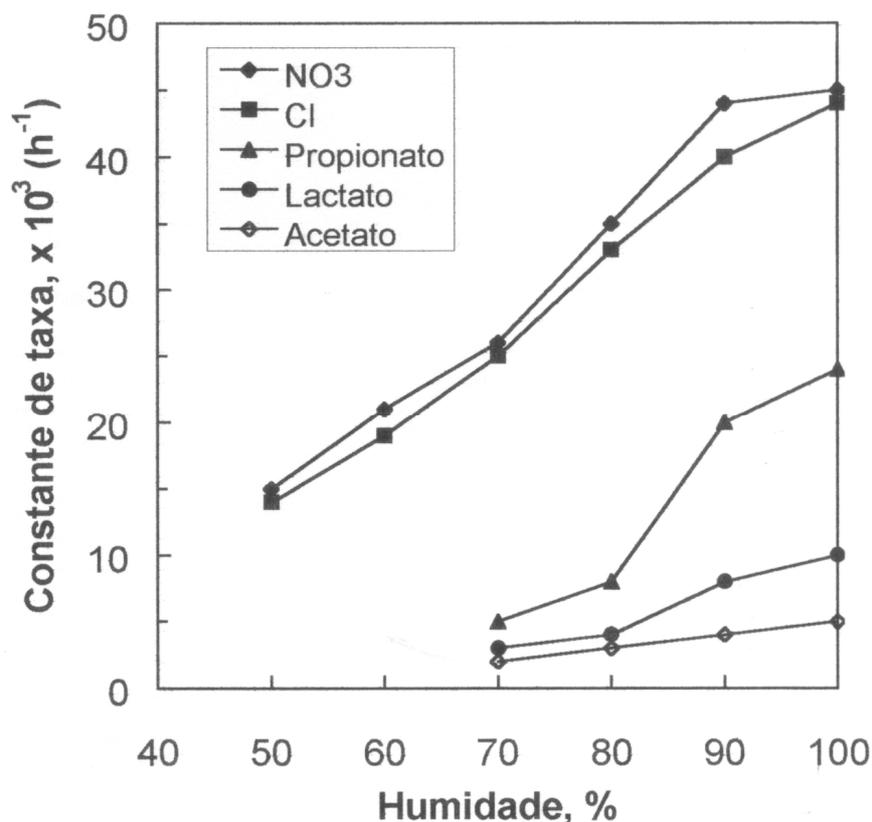


Figura 26: Penetração comparada de Ca, formulado em diferentes substâncias, em cutículas sem estômatos isoladas de rutos de maçã. Foi adicionado um agente molhantes à solução.

- Magnésio

O Sulfato de Magnésio é a fonte mais tradicional do nutriente. Carregadores alternativos seriam o MgO, MgCl₂.6H₂O, Mg(NO₃).6H₂O e quelados (como Mg-EDTA, por exemplo). Medidas de condutividade sugerem que a absorção de Mg do Mg-EDTA deve ocorrer quando a umidade relativa do ar é maior que 65 %, enquanto que o sulfato requereria umidade maior que 80 % para ser absorvido (Alexander e Schroeder, 1987).

Foi demonstrado que os sais de magnésio são absorvidos pelas folhas do cafeeiro na seguinte ordem: Mg NO₃ > MgCl₂ > MgSO₄, o que foi confirmado por Razeto e Salas (1986), quando relataram que o nitrato de magnésio foi mais efetivo que o sulfato em corrigir a deficiência do nutriente em citros. Também Beseli e Fregoni (1986), estudando a correção do sintoma de “die back” em videira, encontraram a seguinte ordem crescente de eficiência de absorção de Mg: óxido, sulfato, nitrato, cloreto = quelado “protalosato”. Podem, eventualmente ser empregadas fontes orgânicas de Mg. Neste sentido, Muller (1986) relatou que os compostos de Mg apresentaram a seguinte ordem decrescente de absorção: citrato, sulfato, glutamato e asparaginato.

- Enxôfre

O enxôfre tem sido o íon acompanhante na maioria dos sais empregados em adubação foliar. Via de regra, produtos contendo sulfato são absorvidos em menor quantidade que os cloretos ou mesmo nitratos. Comparações entre diversos sulfatos, tendo como objetivo o estudo da absorção do sulfato, se existentes, são raros.

- Boro

As fontes tradicionais de boro são o borax e o ácido bórico. Solubor (205 g kg⁻¹ de B) e novos produtos como ácido bórico em alquilinol ou monoetanol-amina (líquidos, 100 g L⁻¹ de B), ainda não disponíveis no Brasil, dão resultados semelhantes quando aplicados às folhas do algodoeiro (Guertal et al., 1996).

- Cobre

A absorção de cobre depende também do sal utilizado. O sulfato é significativamente menos absorvido que o nitrato ou acetado (Chamel, 1988). Entretanto, a deficiência pode ser corrigida com CuSO₄ ou mesmo calda bordalesa (Ritter, 1980).

- Ferro

Ferrandon e Chamel (1988) mostraram que o Fe do FeSO₄ era mais absorvido que o do Fe-EDTA, não havendo grandes diferenças quanto à translocação. Entretanto, os mesmos autores (1989) demonstraram que o Fe que foi considerado absorvido no primeiro trabalho, na realidade havia ficado retido nas gorduras epicuticulares. Quando o sulfato foi quelatizado com EDTA, EDDHA ou DTPA, tanto a

absorção como a translocação foram melhoradas em relação à aplicação do sal (Tabela 12).

Tabela 12: Efeito de agentes quelatizantes na absorção e translocação do Ferro.

Forma aplicada	Absorvido		Translocado	
	% do aplicado	% do absorvido	% do aplicado	% do absorvido
Sulfato	0,9 b	7,1 c	0,06	
EDTA	19,9a	26,8a	5,33	
EDDHA	15,0a	19,4 b	2,91	
DTPA	14,1a	22,0a	3,10	

De acordo com a tabela 12, mesmo com as fontes que proporcionaram melhor translocação, a quantidade de Fe que realmente sai da folha, em relação à quantidade aplicada, é muito pequena.

- Manganês

A fonte mais tradicional de Mn é o sulfato. Existem diversos relatos de correção de deficiências com muito mais eficiência via foliar que via solo, utilizando-se o $MnSO_4$ (Kannan, 1991). Entretanto, parte do $MnSO_4$ fica retida na barreira cuticular, não sendo efetivamente absorvida pela folha (Ferrandon e Chamel, 1988). O $MnCl_2$ é menos retido na cutícula que o $MnSO_4$ e o Mn-EDTA praticamente não apresenta retenção. O Mn-EDTA é ainda bem mais sujeito a lavagem por chuvas logo após a aplicação. Em outro experimento, Ferrandon e Chamel (1989) mostraram que a absorção de Mn na forma de sulfato, EDTA ou EDDHA foi semelhante, mas a quelatização com DTPA proporcionou melhor absorção (Tabela 13). Por outro lado, somente o EDTA promoveu melhor translocação do nutriente.

Tabela 13: Efeito de agentes quelatizantes na absorção e translocação do manganês.

Forma aplicada	Absorvido		Translocado	
	% do aplicado	% do absorvido	% do aplicado	% do absorvido
Sulfato	20,8 b	1,5 c	0,31	
EDTA	26,9a	7,9 ^a	2,12	
EDDHA	24,6a	1,8 b	0,44	
DTPA	34,1a	1,6 ^a	0,55	

Boaretto et al. (2000) observaram que folhas de milho apresentaram a seguinte ordem decrescente de absorção de Mn: Cl^- >> lignosulfonado > sulfato > EDTA, até 60 dias após a aplicação. Silva et al. (1997) também demonstraram que, em tratamentos onde havia compostos contendo Cl^- , a absorção de Mn por folhas de

citros foi bem maior que quando o nutriente foi aplicado na forma de sulfato ou quelado.

Mesmo na melhor das hipóteses, a quantidade do nutriente que foi translocada para outros órgãos foi muito pequena, o que também foi observado por Boaretto et al. (2000), tornando difícil a explicação para os bons resultados que se tem observado em condições de campo com a correção da deficiência de Mn via foliar.

Tendo-se em conta somente a absorção, a eficiência do Mn-EDTA é 7,7 vezes menor que a do MnSO_4 . Entretanto, quando se considera somente a translocação a situação se inverte e o Mn-EDTA é 60 vezes mais eficiente. Combinando-se os processos, Ferrandon e Chamel (1988) chegaram à conclusão de que o Mn-EDTA seria 8 vezes mais eficiente que o MnSO_4 .

Em condições de campo, em pomares de laranja, Razeto e Salas (1986) mostraram que, embora tenha havido tendência não significativa do Mn-sequestre aumentar a produção por árvore (Tabela 14), o sulfato foi mais eficiente em corrigir a deficiência nas folhas (Figura 27). Assim, plantas com deficiência corrigida nas folhas, acabaram não produzindo mais que a testemunha, enquanto que plantas ainda com deficiência, como no caso do Mn quelatizado, produziram mais, sendo esta uma evidência de melhor translocação do Mn aplicado como quelado, pois o nutriente aplicado atingiu os frutos em maior proporção. Estas observações reforçam as conclusões de Ferrandon e Chamel (1988) quanto à absorção e translocação das formas de Mn.

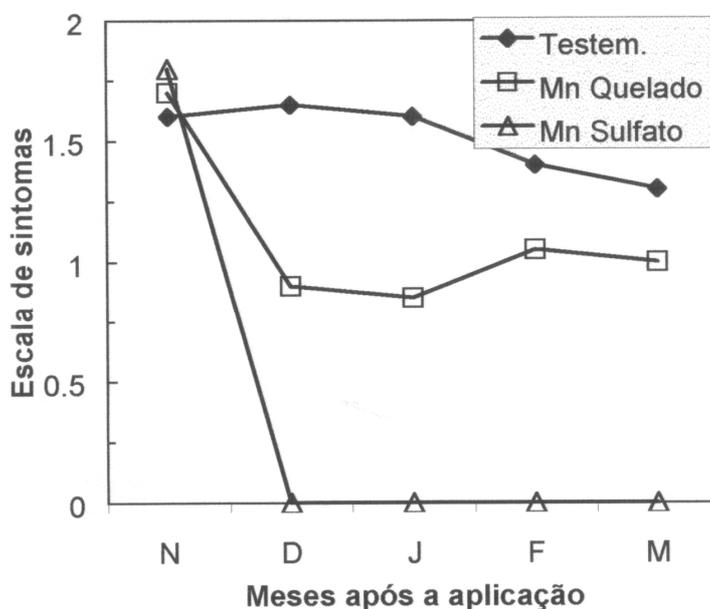


Figura 27: Intensidade de seintomas de amrelecimento de folhas de laranjeiras tratadas com Mn como sal e quelatizado.

Tabela 14: Efeito de adubos foliares na produção de laranja.

Produto	Concentração (%)	Produção relativa
Testemunha	-	100
Sulfato de magnésio	2.00	98
Nitrato de magnésio	1.20	101
Sulfato de manganês	0.12	97
Manganês quelatizado (sequestrene)	0.12	117
Sulfato de Zinco	0.20	106
Zinco quelatizado (sequestrene)	0.12	71
MgSO ₄ + MnSO ₄ + ZnSO ₄	-	100
MgSO ₄ + Mn + Zn (quelatizados)	-	106

- Molibdênio

Molibdato de amônio ou ácido molíbdico podem ser usados como fonte de Mo, mas o molibdato de sódio tem sido mais empregado. Não foram encontradas, na literatura, comparações entre fontes de Mo, quando em aplicação foliar.

- Zinco

A aplicação de sulfato de zinco tem sido considerada como padrão para o nutriente, entretanto o nitrato de zinco, cloreto de zinco ou mesmo a mistura de sulfato de zinco com sais contendo cloreto (Garcia e Salgado, 1981) tem sido mais eficientes (Figura 28). O óxido de zinco, apesar de mais barato, apresenta problemas de solubilidade. Desta forma foi tentada sua solubilização através de solventes orgânicos e inorgânicos, cujos resultados encontram-se na Tabela 15, adaptada de Moraes et al. (1978). Na referida tabela pode-se notar que a solubilização do óxido de zinco com solventes inorgânicos (ácidos nítrico e clorídrico), assim como sua formulação com EDTA, proporcionaram melhor absorção que o sulfato de zinco. O EDTA proporcionou absorção menor que as formulações com ácidos nítrico e clorídrico. Estes resultados confirmam as observações de Garcia e Salgado (1981).

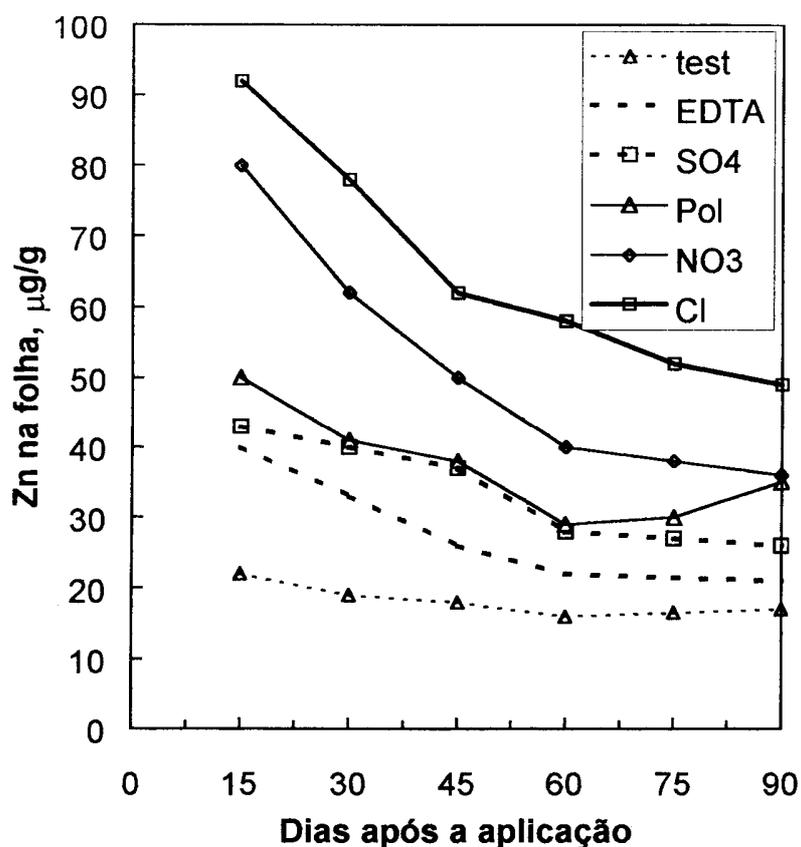


Figura 28: Efeito de zinco na absorção foliar do nutriente pelo cafeeiro (Pol-Polihexise vegetal).

Tabela 15: Teores de zinco em folhas de cafeeiro, em função de solventes de óxido de zinco (Moraes et al., 1978).

Tratamentos	Teor de Zn na folha (mg kg ⁻¹)
Água	10a*
Ácido salicílico	19 ^a
Ácido acético	20 ^a
Sulfato de zinco	45 b
Ácido sulfúrico	57 bc
EDTA	72 c
Ácido nítrico	114 d
Ácido clorídrico	119 d

*letras diferentes indicam diferença significativa (Tukey, P<0,05).

Embora a maioria dos produtos comerciais seja formulada com agentes quelatizantes, quando a fonte de zinco não é o óxido, não tem sido observadas vantagens em termos de absorção de produção em função da quelatização (Garcia e Salgado, 1981; Martins et al., 1981). Silva et al. (1997) observaram que a absorção de Zn por folhas de citros foi bem maior quando a solução continha Cl^- do que quando o Zn era quelatizado ou aplicado como sulfato.

Entretanto, Parducci e Camargo (1990) mostraram que o quelado AGER-Zn (marca registrada) foi mais eficiente em aumentar o teor de Zn em folhas de cafeeiro que o sulfato, mostrando eficiência próxima à da mistura de sulfato de zinco com cloreto de potássio (figura 29). Ferradon e Chamel (1988) mostraram, entretanto, que boa parte do Zn do sulfato, e mesmo do cloreto, ficam retidos na cutícula, ao contrário do Zn-EDTA. Por outro lado, o Zn-EDTA é mais sujeito a perdas por lavagem (Tabela 16).

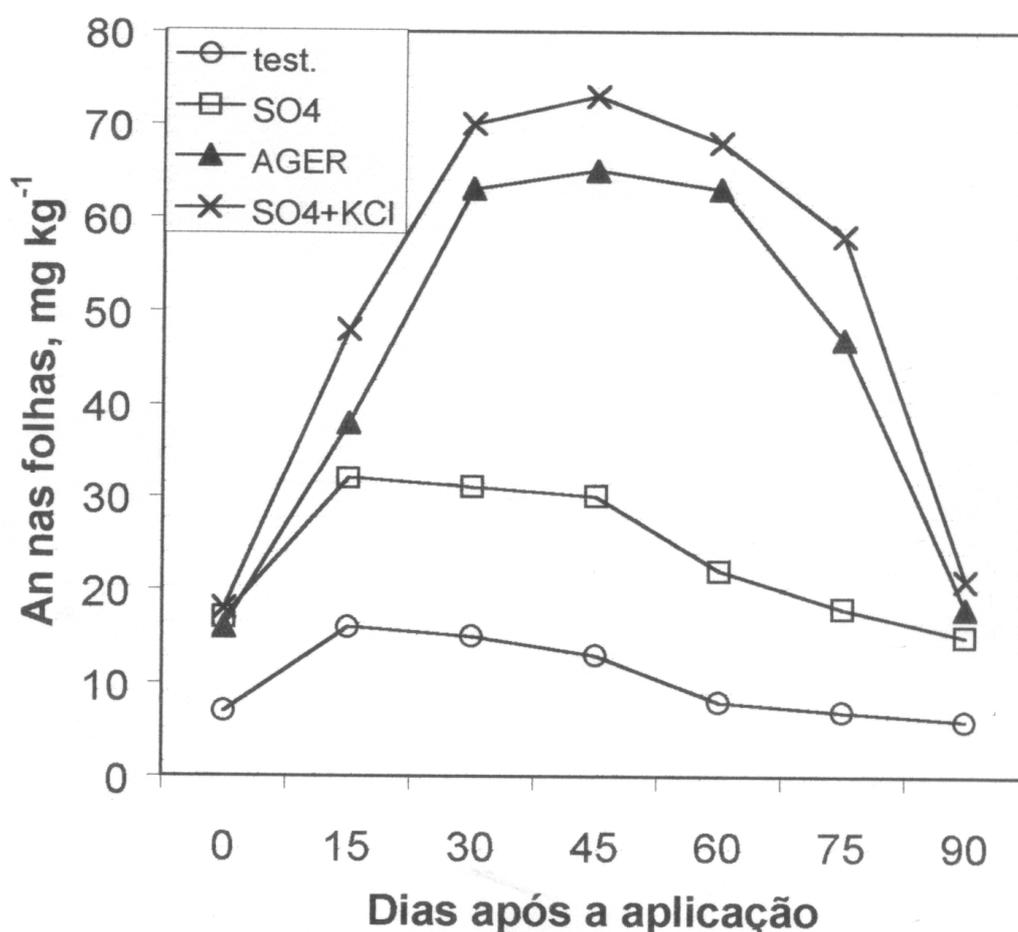


Figura 29: Teores de Zn em folhas de cafeeiro em função das fontes orgânicas e inorgânicas do nutriente.