EFEITOS DO POTÁSSIO E DA DENSIDADE DO SOLO NA MORFOLOGIA DAS RAIZES DO MILHO, SUPRIMENTO E INFLUXO DE K, Ca e Mg.

Mauro Becker—

Dissertação apresentada como um dos requisitos ao Grau de Mestre em Agronomia, área de Concentração Solos, setor de Fertilidade do Solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

Novembro, 1984

1/ Engenheiro Agrônomo (UFSC-SC)

"EFEITO DO POTÁSSIO E DA DENSIDADE DO SOLO NA MORFOLOGIA DAS RAÍZES DO MILHO, SUPRIMENTO E INFLUXO DE K, Ca e Mg"

MAURO BECKER

Engenheiro Agrônomo (UFSC)

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos

para obtenção do grau de

MESTRE EM AGRONOMIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

PORTO ALEGRE (RS) - BRASIL

Aprovada em: 30.11.1984 Homologada em: 11.03.1985

Pela Banca Examinadora: Por:

M. Sc. EGON JOSÉ MEURER
Professor Orientador

Profª M.Sc. EMA MAGALHÃES LEBOUTE
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Agronomia - UFRGS

Dr. HUMBERTO BOHNEN
Professor UFRGS

Dr. IBANOR ANGHINONI
Professor UFRGS

Prof. Dr. AINO VICTOR ÁVILA JACQUE
Diretor da Faculdade de Agronomia
UFRGS

Dr. JOÃO MIELNICZUK
Professor UFRGS

AGRADECIMENTOS

Ao professor Egon José Meurer pela dedicação, amizade e orientação prestadas no decorrer do Curso de Pós-Graduação e na elaboração deste trabalho.

À Empresa Catarinense de Pesquisa Agropecuária (EMPASC), pela oportunidade de realização deste curso.

Aos professores, colegas e funcionários do Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia da UFRGS que de alguma forma contribuiram para a realização deste trabalho.

A Deus por ter me dado forças para vencer mais esta etapa da minha vida.

Ao Dr. Sebastião e Iara Cassias pelo estímulo e dedicação dispensada.

Em particular a meus pais Altino e Jaci e irmãos Lourenço, Rosa e Sandra que com muito carinho me acompanharam na caminhada de minha formação profissional.

Em especial a minha esposa Raquel pelo amor e carinho recebidos durante este período.

EFEITOS DO POTÁSSIO E DA DENSIDADE DO SOLO NA MORFOLOGIA DAS RAIZES DO MILHO, SUPRIMENTO E INFLUXO DE K, Ca e Mg

Autor: Mauro Becker
Orientador: Prof. Egon José Meurer

RESUMO

O conhecimento de como características do solo afetam o suprimento de nutrientes, a morfologia das raízes e a sua absorção pelas plantas é indispensável para o desenvolvimento de práticas eficientes de fertilização.

Neste trabalho foram avaliados os efeitos de doses de K, da idade da planta e da densidade do solo na morfologia de raízes, no suprimento e no influxo de K, Ca e Mg em plantas de milho em experimentos em câmara de crescimento, utilizando-se dois solos do Rio Grande do Sul, Cruz Alta (Typic Haplorthox) e Santo Angelo (Typic Haplorthox).

Desde os períodos iniciais de crescimento do milho a difusão foi o principal mecanismo de suprimento de potássio às raízes, mesmo quando o seu teor no solo foi alto. O nível de K no solo não afetou o suprimento de cálcio e magnésio, que ocorreu por intercepção radicular e fluxo de massa. Com o aumento do teor de K no solo diminuiu o comprimento de raízes e seu raio médio foi maior; aumentou o influxo de potássio, diminuindo o de cálcio e magnésio. O in fluxo destes nutrientes diminuiu com a idade das plantas.

O aumento da densidade dos solos diminuiu a absorção de K e do Ca pelo milho. O influxo de nutrientes e a produção de matéria seca do milho diminuiu no Santo Angelo. No solo Cruz Alta houve decréscimo no comprimento de raízes mas o influxo de nutrientes não foi afetado.

1/ Dissertação de Mestrado em Agronomia (Solos) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande so Sul, Porto Alegre (139p.) - Novembro, 1984.

EFFECTS OF POTASSIUM AND SOIL BULK DENSITY ON CORN ROOT MORPHOLOGY, SUPPLY AND INFLUX OF K, Ca AND Mg

Author: Mauro Becker
Adviser: Prof. Egon José Meurer

SUMMARY

It is very important for the development of efficient fertilization practices the knowledge of how soil characteristics affect root morphology, supply and uptake of nutrients by plants.

In this work were evaluated, in growth chambers experiments, the affects of K soil level and bulk density on corn root morphology, supply and influx of K, Ca and Mg, in two soils of Rio Grande do Sul, Cruz Alta (Typic Haplorthox) and Santo Angelo (Typic Haplorthox).

Since early stages of corn development diffusion was the main mechanism of K supply to corn roots, even when its soil level was high. Calcium and magnesium supply were not affected by K level but rather were performed by root interception and mass flow. Increasing K level in soil caused a reduction on root lenght and increase its root radius, higher K influx and lower Ca and Mg influx. The influx of K, Ca and Mg decreased with plant age.

Increasing soil bulk density decrease K and Ca uptake by corn. The influx of nutrients and corn dry matter decreased in the Santo Angelo. In the Cruz Alta there was decrease in root lenght but the influx of nutrients was not affected.

1/ M.Sc. Dissertation in Agriculture (Soils) - Agricultural School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre (139p.) - November, 1984.

SUMÁRIO

	Página
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Mecanismos de suprimento de nutrientes às raízes das plantas	3
2.2. Absorção de nutrientes pelas plantas	11
2.2.1. Morfologia do sistema radicular	11
2.2.2. Cinética da absorção de nutrientes pelas plantas	12
2.3. Fatores que afetam a absorção de nutrientes e a morfologia das raízes das plantas	17
2.3.1. Compactação do solo	17
2.3.2. Aeração do solo	19
2.3.3. Umidade do solo	20
2.3.4. Temperatura do solo	21
2.3.5. Idade da planta	22
2.3.6. Efeito da espécie	25
2.3.7. pH do solo	26
2.3.8. Teores de nutrientes no solo	28
2.4. Modelos de absorção de nutrientes	34
3. Material e Métodos	38
3.1. Solos	38
3.2. Preparo dos solos	39
3.3. Lavagem dos solos	40
3.4. Preparo dos vasos	41
3.5. Pré-germinação e transplante	43
3.6. Cultivo	43
3.7. Análise do solo	46
3.7.1. K, Ca e Mg trocáveis	46
3.7.2. K, Ca e Mg solução	47
3.8. Análise do tecido	47
3.9. Cálculos	48
4. Resultados e Discussão	51
4.1. Experimento I - Doses de K	51
4.1.1. Mecanismos de suprimento de K, Ca e Mg às raízes do milho	51
4.1.1.1. Suprimento de K	51

Página

4.1.1.2. Suprimento de Ca 57
4.1.1.3. Suprimento de Mg 57
4.1.2. Morfologia do sistema radicular 61
4.1.3. Absorção de K, Ca e Mg pelo milho .. 63
4.2. Experimento II - Idade das plantas 65
4.2.1. Mecanismos de suprimento de K, Ca e Mg às raízes do milho 66
4.2.1.1. Suprimento de K 66
4.2.1.2. Suprimento de Ca 68
4.2.1.3. Suprimento de Mg 72
4.2.2. Morfologia do sistema radicular 74
4.2.3. Absorção de K, Ca e Mg pelo milho .. 78
4.3. Experimento III - Compactação do solo 82
4.3.1. Mecanismos de suprimento de K, Ca e Mg às raízes do milho 83
4.3.1.1. Suprimento de K 83
4.3.1.2. Suprimento de Ca 88
4.3.1.3. Suprimento de Mg 90
4.3.2. Morfologia do sistema radicular 90
4.3.3. Absorção de K, Ca e Mg pelo milho .. 95

5. Conclusões 98

6. Bibliografia Citada 99

7. Apêndices 109

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1. Classificação e algumas características físicas e químicas dos solos Santo Ângelo e Cruz Alta .. 38

2. Absorção de K pelo milho e quantidades supridas às raízes por intercepção radicular, fluxo de massa e difusão, durante 15 dias de cultivo no solo Cruz Alta com quatro doses de K (médias de três repetições) 52

3. Produção de matéria seca, volume de raízes, taxa de absorção de água e taxa de transpiração por planta de milho, após 15 dias de crescimento, no solo Cruz Alta com quatro níveis de K adicionados 54

4. Teores de K, Ca e Mg no tecido (raiz e parte aérea) do milho, após 15 dias de cultivo no solo Cruz Alta, com a aplicação de quatro doses de potássio (médias de três repetições) 55

5. Absorção de Ca pelo milho e quantidades supridas por intercepção radicular e fluxo de massa durante 15 dias de cultivo, no solo Cruz Alta com quatro doses de K (médias de três repetições) 58

6. Absorção de Mg pelo milho e quantidades supridas por intercepção radicular, fluxo de massa e difusão, durante 15 dias de cultivo, em solo Cruz Alta com quatro doses de K (médias de três repetições) 60

7. Características morfológicas de raízes, taxa de crescimento radicular e influxo de K, Ca e Mg por milho, durante 15 dias de cultivo no solo Cruz Alta, com a aplicação de quatro doses de potássio (médias de três repetições) 62

Página

8. Estimativa da absorção de K pelo milho e das quantidades supridas por intercepção radicular, fluxo de massa e difusão em três períodos de crescimento das plantas nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 67

9. Estimativa de absorção de Ca pelo milho e das quantidades supridas por intercepção radicular e fluxo de massa em três períodos de crescimento das plantas nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 69

10. Estimativa da produção de matéria seca (raiz e parte aérea) e do volume de raízes em três períodos de crescimento do milho cultivado nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 71

11. Estimativa da absorção de Mg pelo milho e das quantidades supridas por intercepção radicular, fluxo de massa e difusão, em três estágios de crescimento das plantas nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 73

12. Estimativa das características morfológicas e da taxa de crescimento de raízes de milho em três períodos de cresicmento nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 79

13. Estimativa das taxas de transpiração e absorção de água e do influxo de K, Ca e Mg em três períodos de crescimento do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 80

14. Teores de K, Ca e Mg no tecido (raiz e parte aérea), em três períodos de crescimento do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 81

15. Efeito da compactação na absorção e no suprimento de K para o milho em 17 dias de cultivo nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 84

16. Efeito da compactação na produção de matéria seca, volume de raízes, taxa de absorção de água e taxa de transpiração do milho, cultivado por 17 dias nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo 85

Página

17. Efeito da compactação na absorção e no suprimento de Ca para o milho em 17 dias de cultivo nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 89

18. Efeito de compactação na absorção e no suprimento de Mg para o milho em 17 dias de cultivo nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 91

19. Efeito da compactação nas características morfológicas de raízes, taxa de crescimento radicular e influxo de K, Ca e Mg por milho cultivado por 17 dias nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 93

20. Teores de K, Ca e Mg no tecido (raiz e parte aérea), do milho, com 17 dias de idade, cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições) 97

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

1. Corte transversal da raiz, mostrando os caminhos percorridos pela água e nutrientes até os vasos do xilema no cilindro central 13

2. Relação entre a absorção de K por plantas de milho com 18 dias de idade e a concentração de K em solução nutritiva agitada (BARBER, 1982) 15

3. Corte do vaso utilizado para o cultivo de milho.. 42

1. INTRODUÇÃO

O crescimento adequado das plantas depende em parte do suprimento de nutrientes pelo solo. Métodos empíricos (químicos) tem sido usados para medir a disponibilidade de nutrientes no solo para as plantas. Estes, entretanto, agem por substituição ou deslocamento de íons, ou dissolução seletiva de substâncias minerais ou orgânicas, enquanto que as raízes agem por "depleção" da solução do solo e/ou excreção de substâncias que aumentam a solubilidade dos nutrientes na rizosfera.

A disponibilidade dos nutrientes para as plantas é determinada por fatores que afetam a capacidade das plantas em absorver e utilizar os nutrientes que são supridos.

Para que ocorra a absorção de nutreintes é necessário que os mesmos entrem inicialmente em contato com a superfície das raízes. O suprimento de nutrientes depende de parâmetros físicos e químicos do solo e envolve os mecanismos que determinam o fluxo de nutrientes até a superfície das raízes. A absorção de nutrientes, propriamente dita, depende por sua vez, da morfologia do sistema radicular (taxa de crescimento, raio médio e comprimento de raízes) e é descrita pelos parâmetros cinéticos das plantas (Imax, Km) da

equação de Michaelis-Menten.

Modêlos matemáticos foram desenvolvidos para verificar ou predizer os efeitos dos parâmetros de solo e de planta na absorção de nutrientes pelas mesmas. Apesar das medidas dos parâmetros solo-planta incluídos nos modêlos serem complexas para serem usados em testes rotineiros de disponibilidade de nutrientes, os modêlos podem ser utilizados como ferramenta de pesquisa para desenvolver sistemas de rotina que possam prever mais corretamente a disponibilidade de nutrientes para um dado grupo de solos. O uso deste procedimento traz uma base fundamental para a avaliação da fertilidade do solo, recomendação e localização de adubos.

Os objetivos deste trabalho foram os de verificar os efeitos da adição de doses de potássio, da idade das plantas e da compactação do solo sobre a morfologia do sistema radicular, suprimento e absorção de K, Ca e Mg por plantas de milho em dois solos do Rio Grande do Sul.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mecanismos de suprimento de nutrientes às raízes das plantas

Para que um nutriente seja absorvido pelas plantas é necessário, fundamentalmente, que entre em íntimo contato com a superfície das raízes. Este ocorre através do crescimento radicular, ou pelo movimento dos íons, no solo, em direção às raízes, já que as plantas só tem habilidade para absorver aqueles íons que estão intimamente contactados a ela.

Para explicar como ocorre o movimento de íons através da solução do solo em direção às raízes das plantas, foram propostos três mecanismos, chamados de intercepção radicular, fluxo de massa e difusão (BARBER, 1962; BARBER et alii, 1963; OLIVER & BARBER, 1966a).

As raízes das plantas ao crescerem através dos espaços porosos do solo entram em contato com os nutrientes (intercepção radicular), absorvendo-os. Desta forma a quantidade máxima de íons supridas pelo mecanismo de intercepção radicular, seria aquela presente em um volume de solo igual ao ocupado pelo sistema radicular. Portanto, se as raízes das plantas ocupam menos que 1 a 2% do volume do solo, elas

não podem entrar em contato com mais de 1 a 2% dos nutrientes disponíveis no solo (BARBER, 1982).

A intercepção radicular é um mecanismo importante no suprimento de íons que normalmente estão em concentrações mais elevadas no solo. Segundo OLIVER & BARBER (1966a, b), a intercepção radicular foi o principal mecanismo no suprimento de Ca, Mg, Al, Sr e Cu às raízes de soja. Estes autores constataram através de experimentos em vasos, com solos argilosos, que este mecanismo foi capaz de suprir em média, 100% do Ca e 57% do Mg que foi absorvido por soja. VARGAS et alii (1983), em experimento com milho, em câmara de crescimento, utilizando doze amostras de solos do Rio Grande do Sul, encontraram que, em média 35% do Ca e 8,6% do Mg foram supridos às raízes por intercepção radicular. Verificou-se nestes trabalhos que a contribuição no suprimento de P e K por este mecanismo foi muito pequena devido às suas baixas concentrações nos solos em estudo.

OLSEN & KEMPER (1968) e NYE & TINKER (1977) contestam a intercepção radicular como mecanismo de suprimento de íons às raízes das plantas. Segundo estes autores a intercepção radicular é um fenômeno improvável de ocorrer por considerarem que os íons antes de serem absorvidos pelas raízes são por elas deslocados para então moverem-se em sua direção por fluxo de massa ou difusão. Consideram ainda, que subtraindo do total de nutrientes absorvidos pela planta as quantidades supridas por intercepção radicular e fluxo de massa, estar-se-ia minimizando o efeito real da difusão no

suprimento de nutrientes às plantas.

As pressuposições feitas por BARBER et alii (1963), para calcular a quantidade de íons supridas por intercepção radicular também foram contestadas por PASSIOURA (1966). Para este autor, a contribuição deste mecanismo é superestimada, principalmente para os íons supridos em grandes quantidades como é o caso do Ca.

VARGAS et alii (1983), trabalhando com doze amostras de solos do Rio Grande do Sul, calcularam a contribuição da intercepção radicular no suprimento de Ca às raízes de milho pelo "volume de poros", proposto por BARBER et alii (1963) e pelo "volume de solo", que considera que as raízes entram em contato com um volume de solo proporcional ao seu volume, verificando que pelo cálculo do "volume de poros", a intercepção radicular foi superestimada em 53%, em relação aos valores obtidos pelo outro procedimento.

Nas últimas revisões apresentadas por BARBER (1974, 1980, 1982), este autor tem definido a contribuição deste mecanismo como sendo a quantidade de nutrientes contidos em um volume de solo igual ao volume de raízes, ao invés da contida em um volume de poros, como inicialmente proposto.

Para repor a água que é perdida pela transpiração as plantas absorvem água do solo, criando um fluxo de água em direção às raízes, conhecido como fluxo de massa. Os nutrientes presentes na solução do solo são levados desta forma, até à superfície radicular, tornando-se disponíveis às plantas (BARBER, 1962). Para COREY & SCHULTE (1973), a

quantidade de nutrientes supridos por fluxo de massa depende:

1. De quanto a planta requer do nutriente;
2. Da concentração do nutriente na solução do solo;
3. Da quantidade de água transpirada.
4. Do volume efetivo de água, movendo-se em direção ao gradiente de potencial hídrico, bem como do seu contato com a superfície das raízes.

A quantidade de água transpirada por grama de matéria seca produzida é em média de 400 g (BARBER, 1962) e considerando teores no tecido de aproximadamente 2,0% (20.000 µg/g) de K, 0,30% (3.000 µg/g) de Ca, 0,20% (2.000 µg/g) de Mg e 0,25% (2.500 µg/g) de P (BARBER et alii, 1963), então a solução do solo deveria conter 20.000/400, 3.000/400, 2.000/400 e 2.500/400, ou seja, 50, 7,5, 5,0 e 6,3 µg/g de K, Ca, Mg e P, respectivamente, para que estes nutrientes fossem supridos totalmente por fluxo de massa. BARBER et alii (1962) determinaram a concentração de K, Ca, Mg e P de 135 amostras de solo do centro-oeste dos Estados Unidos, encontrando valores de 4,0, 30, 25 e 0,05 µg/g de K, Ca, Mg e P, respectivamente, indicando que para aquelas concentrações no tecido das plantas e taxa de transpiração, todo o Ca e Mg necessários à planta poderiam ser supridos totalmente pelo fluxo de massa. Para que isto ocorresse com o K e P, seriam necessários teores na solução do solo maior de 50 µg/g para K e de 6,3 µg/g para o P. Isto evidencia a importância

deste mecanismo no suprimento de Ca e Mg às plantas.

Em experimentos conduzidos em vasos, OLIVER & BARBER (1966a, b) encontraram que quantidades superiores de Ca, Mg, Cu e B, foram supridos às raízes de soja por fluxo de massa, em relação ao que foi absorvido pelas plantas, bem como grande parte do Fe e do Zn. VARGAS et alii (1983), trabalhando em câmara de crescimento com doze amostras de solos do Rio Grande do Sul, encontraram que em todos os solos, o fluxo de massa supriu todo o Ca requerido por milho e todo o Mg requerido, em seis das amostras de solo, nas outras seis, a média no suprimento de Mg por este mecanismo foi de 74,4%. Para o P e K, os valores encontrados foram de 2,6% e 10%, respectivamente, evidenciando que para íons como o P e o K, cujas concentrações na solução do solo normalmente são baixas, a contribuição relativa do fluxo de massa no suprimento dos mesmos é pequena.

Se a concentração de um íon na solução do solo for alta e se ele for suprido por fluxo de massa em maiores quantidades do que a planta o absorve, haverá acúmulo do mesmo próximo à superfície das raízes. Alguns trabalhos, com o auxílio da técnica de radioautografia têm mostrado esta ocorrência, para o ^{45}Ca (BARBER & OZANNE, 1970) e ^{90}Sr (BARBER, 1962).

Em solos com altas concentrações de Ca este elemento pode ser suprido às raízes por fluxo de massa em quantidades maiores do que é absorvido, podendo permanecer como cálcio solúvel ou precipitar junto a superfície das raízes

em forma de sulfatos ou carbonatos (BARBER, 1974). A concentração de um íon no solo pode afetar a solubilidade de outros íons. O acúmulo de Ca próximo a superfície das raízes devido ao suprimento por fluxo de massa, altera a concentração de boratos, fosfatos e de potássio na rizosfera (BARBER, 1971). HOFMANN & BARBER (1971) observaram em solos que continham fosfato de cálcio solúvel como fonte de P para as plantas, que o aumento na solubilidade do Ca reduziu significativamente a absorção de P por trigo, quando estas tinham altas taxas de transpiração. Entretanto, em solos ácidos, onde o P estava disponível na forma de fosfato de ferro ou alumínio, o aumento na concentração de Ca não influenciou a absorção de P. Com baixa taxa de transpiração das plantas, que causaram menor acúmulo de Ca próximo às raízes, houve pequena diferença entre a concentração de P no tecido do trigo e as doses de $CaSO_4$ adicionados ao solo.

As condições ambientais favorecendo uma maior ou menor taxa de transpiração das plantas, afetam diretamente as quantidades de íons supridas por fluxo de massa, sendo que valores de 166 até 905 ml/grama de tecido seco produzido foram obtidos em diferentes trabalhos (BARBER, 1962).

Quando a intercepção radicular e o fluxo de massa suprem menor quantidade de um íon em relação ao que a planta absorve, a concentração deste íon junto a superfície da raíz diminui, originando um gradiente de concentração, normal à superfície das raízes. Através deste gradiente de

concentração se processa a difusão de íons até a superfície radicular (BARBER, 1962). Evidências da ocorrência da difusão de íons no solo foram confirmadas em vários trabalhos, com o auxílio da técnica de radioautografia de elementos marcados, para ^{35}S (BARBER et alii, 1963), ^{32}P (VASEY & BARBER, 1963), ^{86}Rb (WALKER & BARBER, 1962) e ^{65}Zn (WILKINSON et alii, 1968).

A difusão de um íon através da solução do solo é um processo dinâmico, onde vários fatores de solo e de planta determinam sua intensidade. OLSEN & KEMPER (1968), com base na 1ª Lei de FICK, estabeleceram a seguinte equação para determinar a quantidade de nutrientes que se difundem até a superfície das raízes:

$$(dq/dt) = De \cdot A \cdot (dc/dx). \qquad (1)$$

onde: (dq/dt) = a quantidade de íons que se difunde para uma determinada área do sistema radicular na unidade de tempo.

De = coeficiente de difusão efetiva do íon na solução do solo.

A = Área da secção transversal de solo na qual o íon se difunde em direção às raízes.

(dc/dx) = gradiente de concentração do íon.

A difusão de um íon em meio aquoso é diferente da difusão efetiva (De) de um íon na solução do solo. Isto é devido ao fato de que a distância efetivamente percorrida pelos íons

no solo, está na dependência de uma série de características deste, tais como: fator tortuosidade (relação entre a distância em linha reta entre dois pontos no trajeto da difusão e a distância efetivamente percorrida pelos íons), teor de água volumétrica, viscosidade da água, variação no tamanho de poros que tende a restringir o movimento de ânions (OLSEN & KEMPER, 1968) e o poder tampão (BARBER, 1974). O suprimento de íons às raízes por difusão depende também da espécie da planta (HALSTED et alii, 1968; SILVA FILHO et alii 1982), da temperatura da solução do solo e do tipo e distribuição do sistema radicular das plantas (BARBER, 1968).

A difusão é um processo muito importante no suprimento de K e P às raízes das plantas. O K é um íon absorvido em grandes quantidades pelas plantas, fazendo com que em alguns solos a sua concentração diminua consideravelmente na solução próxima às raízes, fazendo com que o mesmo seja transportado até as raízes por difusão. Para o P, embora as quantidades absorvidas pelas plantas sejam menores, os teores em solução na maioria dos solos são baixos, fazendo com que ocorra uma depleção deste nutriente próximo às raízes, originada da absorção pelas plantas, fazendo aumentar consideravelmente a contribuição do suprimento por difusão.

BARBER (1966) verificou que a difusão poderia suprir para o milho 92,3% do P e 71,1% do K, em relação às quantidades absorvidas pelas plantas. VARGAS et alii (1983) em solos do Rio Grande do Sul, encontraram que a difusão foi responsável por 94,2% do P e 89,1% do K suprido às raízes de

milho. Além do P e K, outros nutrientes são supridos por difusão, quando o teor no solo é baixo. OLIVER & BARBER (1966b), encontraram que do total que a soja absorveu, grande quantidade de Fe, Mn e Zn foi suprida às raízes por difusão. VARGAS et alii (1983) observaram em seis das doze amostras de solo estudadas onde o teor de Mg era baixo, que houve suprimento deste elemento por difusão.

2.2. Absorção de nutrientes pelas plantas

2.2.1. Morfologia do sistema radicular

A quantidade de íons que chega até a superfície radicular depende não só das propriedades físicas do solo como também da configuração do sistema radicular (BARLEY, 1970). Se, por exemplo, a área externa do sistema radicular for diminuida pela resistência mecânica do solo, a quantidade de nutrientes que chegarão até a superfície das raízes será menor (VIEIRA, 1978).

Como a taxa de absorção é definida como sendo a entrada de nutrientes por unidade de superfície radicular, as características de planta (raio, comprimento e taxa de crescimento de raízes), que se relacionam com área superficial de raízes, influem diretamente numa maior ou menor taxa de absorção de nutrientes pelas plantas. Os pelos absorventes são prolongações das células da epiderme e contribuem para um aumento considerável da área superficial das raízes,

aumentando a capacidade de absorção de nutrientes pelas plantas.

Em corte transversal (Figura 1), estão esquematizados os pelos radiculares, epiderme, cortex, endoderme com a faixa caspariana e o cilindro central com os vasos de xilema e floema. Entre as células do córtex existem espaços intercelulares pelos quais se movimenta a solução do solo, sendo impedida de chegar aos vasos do xilema devido aos revestimentos de suberina nas células da endoderme, que constituem a faixa caspariana. O transporte de água e nutrientes da superfície radicular até as células da endoderme, pelos espaços intercelulares, ocorre via apoplasto (Figura 1).

As células do sistema radicular possuem uma membrana celulósica que lhes dá a consistência e uma membrana lipoproteica, seletiva à passagem de nutrientes. No interior das células existe o citoplasma, constituintes celulares e vacúolos. O citoplasma de uma célula se liga ao citoplasma de outras células, constituindo uma comunicação celular denominada plasmodesma. Quando a água e nutrientes chegam aos vasos do xilema através do citoplasma das células, se diz que este transporte ocorre via simplasto (Figura 1).

2.2.2. Cinética da absorção de nutrientes pelas plantas

A taxa de absorção de íons por unidade de superfície radicular é denominada de fluxo de entrada de nutrientes

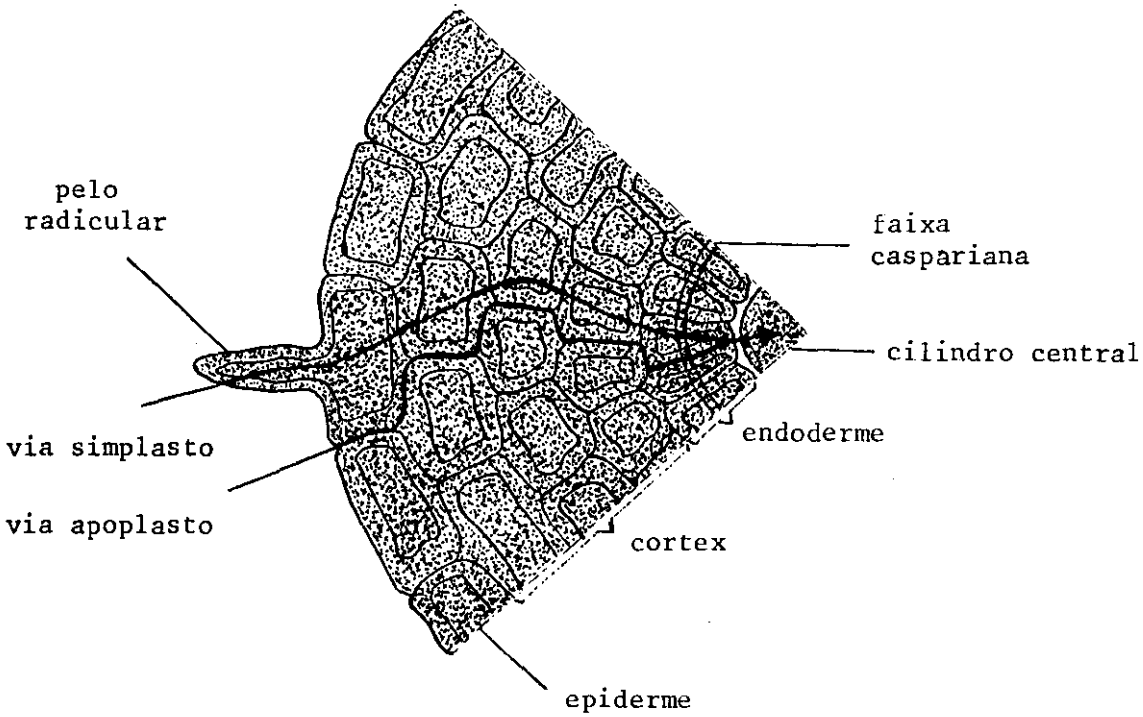


FIGURA 1. Corte transversal da raiz, mostrando os caminhos percorridos pela água e nutrientes até os vasos do xilema no cilindro central (MALAVOLTA, 1980).

ou influxo. O influxo aumenta com o aumento da concentração do íon na solução do solo, até que um máximo é alcançado, sendo que a partir deste, a planta não apresenta mais resposta à absorção para maiores concentrações do íon na solução (BARBER, 1974). A relação entre o fluxo de entrada de nutrientes e a concentração de K de uma solução em agitação é mostrada para o milho, na Figura 2. Esta relação leva em conta características fisiológicas (cinéticas) da planta e é descrita utilizando-se a equação de Michaelis-Menten (EPSTEIN, 1972):

$$I = \frac{Imax \cdot C}{Km + C} \qquad (2)$$

onde: I é a taxa de absorção de nutrientes pelas plantas, Imax a taxa máxima de absorção, C a concentração do nutriente na solução e Km a constante de Michaelis-Menten, que corresponde a concentração do nutriente na solução quando I é igual a 1/2 de Imax.

Como existe uma concentração na solução em que a absorção de nutrientes (I) é nula, foi introduzido outro parâmetro na equação anterior, chamado de concentração mínima (C min), (NIELSEN & BARBER, 1978), ficando a taxa de absorção de nutrientes descrita por:

$$I = \frac{Imax\ (C - Cmin)}{Km + (C - Cmin)} \qquad (3)$$

Para concentrações na solução abaixo desta

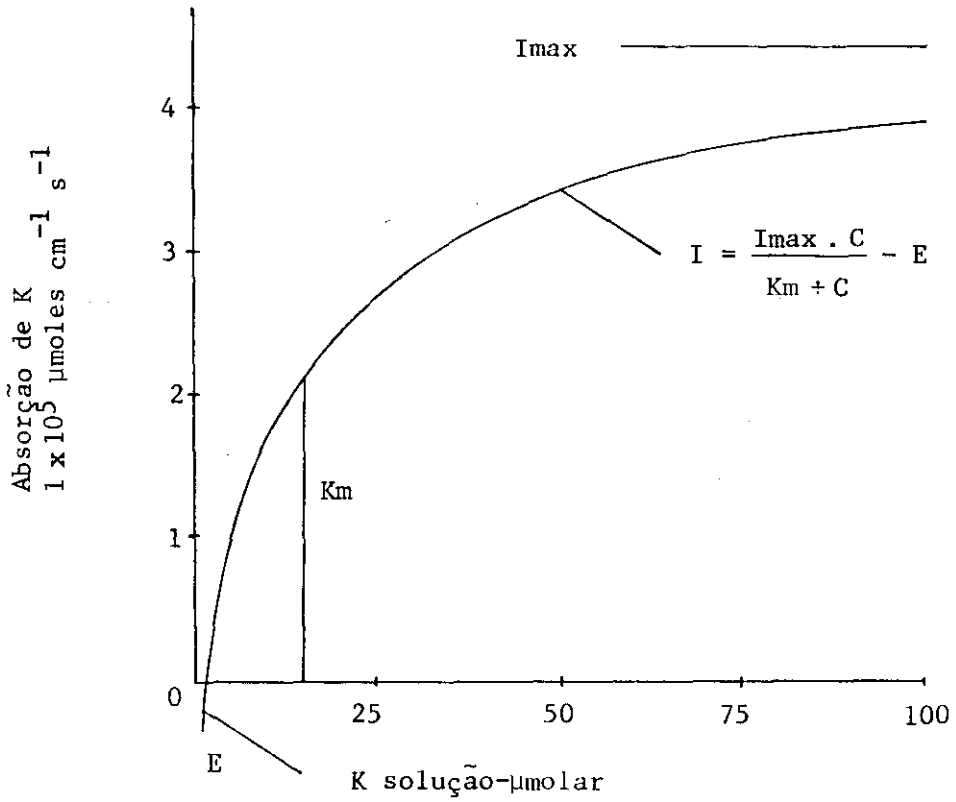


FIGURA 2. Relação entre a absorção de K por plantas de milho com 18 dias de idade e a concentração de K em solução nutritiva agitada (BARBER, 1982).

concentração mínima, não ocorre a absorção de nutrientes (influxo), mas sim um efluxo de nutrientes, ou seja, a planta perde nutrientes para o meio. Este efluxo (E), pode ser utilizado na equação anterior ao invés de C min, ficando:

$$I = \frac{Imax \cdot C}{Km + C} - E \quad (4)$$

Esta equação descreve a absorção de íons em baixas concentrações (0,0 a 0,2 mM), podendo ser utilizada para caracterizar a absorção de nutrientes pelas plantas no solo, pois na maioria dos casos, a concentração iônica da solução do solo esta dentro desta faixa (ANGHINONI, 1979).

O influxo de nutrientes é frequentemente medido usando-se segmentos (vivos), de raízes em pequenos espaços de tempo (HODGES, 1973), mas o mais apropriado é o uso de plantas intactas, absorvendo nutrientes por tempos mais prolongados (CLAASSEN & BARBER, 1974).

A eficiência de absorção é caracterizada pela capacidade da planta em absorver os nutrientes quando se encontram em baixas concentrações no solo. Pelos valores Km e C_{min}, que estão relacionados à capacidade das plantas em absorver nutrientes em baixas concentrações, pode-se avaliar a sua eficiência na absorção de íons.

2.3. Fatores que afetam a absorção de nutrientes e a morfologia das raízes das plantas

2.3.1. Compactação do solo

O decréscimo na penetração da raiz ou da sua taxa normal de crescimento devido ao impedimento mecânico do solo depende da intensidade com que ocorrem as alterações nas propriedades físicas do solo. Segundo CINTRA & MIELNICZUK (1983), solos compactados, além de terem elevados níveis de resistência à penetração, induzem à redução no espaço poroso com consequente limitação da taxa de difusão de oxigênio. Desta forma, a respiração oxidativa que fornece energia para a multiplicação celular, é prejudicada como também a capacidade da raiz em absorver água e nutrientes. Os mesmos autores trabalhando com quatro níveis de compactação em um solo argiloso, cultivado com colza, soja, cevada, tremoço e trigo, verificou que as compactações mais elevadas (11 e 18 $kg.cm^{-2}$) causaram redução na absorção de K, Ca e Mg, exceto no tremoço. Neste o aumento da pressão aplicada ao solo, de 6 para 11 $kg.cm^{-2}$, aumentou a absorção de Ca, possivelmente por ter reduzido a área superficial de raízes e para o K por reduzir a área de secção transversal através da qual o K se difunde até as raízes.

A pressão de turgor das células, na região de crescimento das raízes, normalmente, tem força necessária para empurrar a capa radicular e a região meristemática através do

solo. Se a pressão hidrostática de turgor não é suficiente para vencer a resistência oferecida pelo solo, o crescimento das raízes diminui (TAYLOR, 1971). BALIGAR et alii (1975) verificaram alterações na morfologia de raízes de soja com o aumento da resistência oferecida pelo solo à penetração das mesmas. A alta densidade do solo deixou o cilindro central oval, com aumento da espessura da faixa casperiana na endoderme e na espessura das paredes dos vasos de xilema. As raízes apresentaram superfície irregular na maioria das células da epiderme, sendo que muitas apresentaram rupturas. As células do parênquima cortical tornaram-se esféricas e os espaços intercelulares aumentaram de tamanho. TAYLOR & GARDNER (1963) constataram que, com o aumento da resistência à penetração, devido a maior densidade do solo, houve redução na quantidade de raízes de algodão que penetraram no solo e na sua taxa de crescimento.

A compactação não é necessariamente uma característica adversa à obtenção de nutrientes pelas plantas; isto vai depender da fertilidade do solo, da distribuição das raízes, dos teores de oxigênio e umidade do solo (PARISH, 1971), da textura, temperatura e teor de matéria orgânica do solo (MAURYA & LAL, 1979).

As partículas do solo determinam o fator tortuosidade do solo, ou seja, o caminho pelos quais os íons se difundem até a superfície das raízes. Com o aumento da densidade do solo, até um certo limite, o coeficiente de difusão também aumenta, decrescendo depois rapidamente. Quando um

solo de baixa densidade é comprimido a tortuosidade diminui devido a maior continuidade da fase líquida e à redução do caminho difusivo. Com a compactação excessiva as partículas de solo ficam muito próximas, tornando o caminho difusivo mais tortuoso. WARNCKE & BARBER (1971) constataram aumento na difusão de Zn em seis solos quando a densidade dos mesmos foi elevada até 1,5 g/cm^3, pela diminuição do fator tortuosidade; acima deste valor a difusão do Zn decresceu rapidamente por aumentar o caminho difusivo do Zn no solo ocasionado pela obstrução dos poros.

2.3.2. Aeração do solo

O volume de poros do solo é ocupado por ar e água, respondendo a um balanço entre ambos. A maior influência da aeração sobre o crescimento e desenvolvimento das raízes é atribuido às concentrações de oxigênio e dióxido de carbono no ar do solo. A atividade biológica no solo consome oxigênio e produz dióxido de carbono, através do processo de respiração aeróbica.

O suprimento de oxigênio às raízes em crescimento é controlado pelo gradiente de oxigênio entre a atmosfera e o solo e pelas condições ambientais na zona da raiz que afetam a transferência de oxigênio dos poros do solo até a superfície radicular (VIEGAND & LEMON, 1958). Se ocorrem alterações no solo que limitem a transferência de oxigênio sua concentração próximo à superfície das raízes é reduzida e

com a liberação do dióxido de carbono o meio pode se tornar anaeróbico. O sistema radicular que se desenvolve em meio deficiente em O_2 apresenta raízes curtas e grossas e em conseqüência a área superficial externa das raízes é menor, causando redução na absorção de nutrientes e água e no crescimento das plantas (TAYLOR, 1972).

A falta de oxigênio interrompe a respiração oxidativa nas raízes, não liberando energia que é empregada na síntese de componentes celulares e formação de novas raízes (AMORIM, 1979). Se a concentração de oxigênio for menor que 10% do volume total do solo, há limitação no crescimento das raízes e no desenvolvimento das plantas (VOMOCIL & FLOCKER, 1961).

2.3.3. Umidade do solo

O excesso de água não causa diretamente, injúrias às raízes, isto é mostrado pelo crescimento de raízes em solução nutritiva. Entretanto, o excesso de água no solo deslocando o ar dos poros, acarreta a deficiência de oxigênio o que pode causar a morte das raízes. Segundo GRABLE (1966), a deficiência de água no solo aumenta as lacunas de ar nos espaços intercelulares das células do cortex das raízes; isto provoca a desidratação do tecido cortical e redução na área da secção transversal do cortex, por onde a água e os nutrientes são conduzidos ao cilindro central. Decresce também a condutividade hidraulica na região do cortex,

diminuindo a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Por outro lado, o excesso de água cria condições de anaerobiose, diminuindo o crescimento e as funções das raízes pela falta de oxigênio.

O crescimento das raízes é afetado pelo conteúdo de água no solo por esta alterar a resistência do meio através do qual as raízes se desenvolvem. O crescimento de raízes de milho em pressão de sucção matricial no solo de 12 bares, foi cerca de 75% menor da verificada em pressão de sucção de 1/3 bar (GINGRICH & RUSSEL, 1956).

O aumento no conteúdo de água no solo, aumenta a disponibilidade de íons às plantas, pelo seu maior suprimento às raízes pelos mecanismos de fluxo de massa e difusão (BARBER, 1962), com visto anteriormente.

2.3.4. Temperatura do solo

Muitos processos metabólicos que ocorrem nas plantas dependem da energia proveniente da translocação de fotossintatos da parte aérea. A translocação e utilização de fotossintatos, a absorção de água e nutrientes são lentos com o decréscimo da temperatura do solo (TAYLOR, 1967).

Segundo WALKER (1969), existe uma temperatura mínima no solo na qual não ocorre crescimento de raízes. Acima dela a taxa de crescimento aumenta linearmente até uma temperatura máxima que varia com a espécie da planta. O crescimento de raízes de algodão aumentaram linearmente com o aumento

da temperatura de 18 a 33°C. A 36°C houve redução no crescimento e a 39°C o crescimento praticamente paralizou (ARNDT, 1945).

A temperatura do solo altera a viscosidade da água, a condutividade hidráulica do sistema solo-raiz e as propriedades físicas da parede celular (TAYLOR et alii, 1972). Se mudanças na temperatura alteram a viscosidade da água no solo, a difusão efetiva de íons até a superfície radicular também será afetada.

A cinética da absorção de nutrientes é influenciada pela temperatura das raízes no solo. CHING & BARBER (1979) constataram que para a absorção de K em milho os valores de Imax e Km a 29°C foram praticamente o dobro dos valores obtidos a 15°C; o C min foi menor para a temperatura de 29°C.

2.3.5. Idade da planta

Plantas jovens de milho absorvem grandes quantidades de nutrientes, levando-se em conta a pequena extensão do seu sistema radicular. Com o crescimento do sistema radicular há redução na taxa de influxo de nutrientes por unidade de comprimento radicular. WARNCKE & BARBER (1974) observaram que com o crescimento do milho, a taxa de absorção de K por planta aumentou e atingiu um máximo pouco antes do florescimento. Entretanto a taxa de absorção de K por metro de raiz foi maior nas plantas jovens e diminuiu com a idade. Também foi observado diminuição no influxo de P, K, Ca, Mg e N em

milho com o crescimento das plantas por MENGEL & BARBER (1974a) e EDWARDS & BARBER (1976a, b).

ANGHINONI et alii (1981), constataram que raízes de trigo apresentaram crescimento linear por um período de 40 dias de cultivo, enquanto ocorria redução na taxa de absorção de P e K, decréscimo do Imáx para K e Ca e aumento no valor do Km para K.

Em estudo realizado em vasos com *Allium porrum* (var. Musselburgh), cortados em quatro épocas distintas de crescimento, BREWSTER & TINKER (1970) observaram um aumento exponencial no crescimento de raízes com o aumento de idade das plantas, sendo no entanto mais finas no início do cultivo. Estes autores constataram também que o influxo de K decresceu com o tempo, permanecendo estável o influxo de água.

MENGEL & BARBER (1974b) verificaram, em condições de campo, que o comprimento de raízes de milho dobrava em 1 dia para as plantas com idade de até 20 dias. Em plantas com 50 dias de idade o comprimento de raízes dobrava a cada 5 dias.

Nos últimos anos muitas dúvidas surgiram quanto ao efeito da idade das raízes das plantas sobre sua capacidade de absorção de nutrientes. A teoria mais aceita é que toda a extensão do sistema radicular é ativa na absorção e translocação de íons durante todo o ciclo de desenvolvimento das plantas, entretanto, tem se questionado a possibilidade de que a absorção de íons só ocorre em raízes jovens, sendo elas ativas por apenas alguns dias.

BAR-YOSEF (1971), observou que a absorção de P e Ca por raízes de milho em solução nutritiva foi insignificante após 100 horas de vida,devido a suberização das paredes da endoderme. BHAT & NYE (1974) observaram decréscimo na taxa de absorção de P pelas raízes de colza com mais de oito dias de idade e pelas de cebola após onze dias. MENGEL & BARBER (1974) sugerem uma idade efetiva de raízes de milho à campo de aproximadamente cinco dias. Os resultados encontrados por WIETHÖLTER (1983) indicam que em média 4,1 dias de absorção efetiva por segmentos de raízes de milho são suficientes para suprir o total de K absorvido pelas plantas.

Para CLARKSON & SANDERSON (1971), tanto a absorção como a translocação de P e K em cevada ocorrem em toda a extensão do sistema radicular. Com o uso de radio-cromatografia, ROVIRA & BOWER (1970) observaram em trigo que as raízes absorvem P em quantidades semelhantes ao longo de todo o sistema radicular.

FERGUSON & CLARKSON (1975) verificaram que a absorção de nutrientes por raízes velhas está na dependência do caminho que o íon percorre dentro da raiz até ser absorvido. Assim, para o Ca, que é absorvido preferencialmente via apoplasto, ocorreu limitação na absorção por raízes velhas devido a estas terem maior suberização da endoderme. A absorção de P, por outro lado, que ocorreu preferencialmente via simplasto, não foi limitada pela suberização da endoderme e conseqüentemente pela idade das raízes.

BARBER (1984) aceita a teoria de que o influxo de

íons não é apreciavelmente afetado pela idade das raízes, estando de acordo com os resultados obtidos por ROVIRA & BOWER (1970).

2.3.6. Efeito da espécie

A morfologia e fisiologia das raízes variam com as espécies vegetais. RAPER & BARBER (1970a), comparando duas variedades de soja, verificaram diferenças no comprimento radicular e na área superficial de raízes, diferindo, portanto, na capacidade de explorar o meio. BALIGAR & BARBER (1978) observaram que plantas de milho produzem mais raízes, porém com raio médio menor, que plantas de cebola; entretanto, devido a menor densidade das raízes de cebola a distância média entre elas foi maior que as de milho. Comparando a distância média das raízes de milho com a zona de depleção no solo, verificaram que ocorreu competição entre as raízes pela absorção de nutrientes. Constataram também que o comprimento radicular por grama de tecido foi maior no milho, resultando em menor influxo de água e nutrientes por unidade de comprimento radicular, quando comparado à cebola.

RAPER & BARBER (1970a,b) constataram diferenças morfológicas e eficiência na absorção de K em duas variedades de soja (Aoda e Harosoy 63). A variedade Harosoy 63 apresentou sistema radicular mais extenso e quase o dobro da área superficial de raízes que a Aoda. A taxa de absorção de K por unidade de superfície radicular da Aoda foi

praticamente o dobro da Harosoy 63 em níveis mais elevados de K. Com baixos níveis de K no solo a taxa de absorção de K em ambas foi semelhante.

WARNCKE & BARBER (1974) observaram diferenças significativas na eficiência de absorção de nitrato por milho, soja, sorgo e "bromus". BALIGAR & BARBER (1979) encontraram diferenças no influxo de P, K, Ca e Mg em doze genótipos de milho, que foram atribuidas as diferentes características morfológicas das raízes e aos parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes.

Os valores de Km para K encontrados por vários autores e apresentados por ANGHINONI et alii (1981), para a cevada, sorgo, soja e milho, foi de 21, 40, 27 e 2,7 a 17 respectivamente, demonstrando a maior eficiência de milho na absorção de K.

VILELA & ANGHINONI (1984) constataram em dois cultivares de soja, IAC-2 e Bragg, que parâmetros morfológicos da raiz (comprimento, raio, superfície) e cinéticos de absorção de fósforo (Imax, Km, Cmin), indicaram que a cultivar IAC-2 foi mais tolerante à toxidez de alumínio e mais eficiente em absorver fósforo, tanto na ausência quanto na presença de alumínio do que a Bragg.

2.3.7. pH do solo

Tanto as propriedades físicas como as químicas e biológicas do solo são influenciadas por esta característica.

O pH tem efeito acentuado na disponibilidade dos elementos essenciais às plantas.

A literatura relata fartamente o efeito da reação do solo na disponibilidade dos macro e micronutrientes necessários ao crescimento vegetal, bem como seu efeito na solubilização de elementos tóxicos do solo. A atividade de muitos microorganismos do solo que influem na disponibilidade e absorção de alguns nutrientes, como nitrogênio, fósforo, enxofre, é afetada pela reação do solo. Por outro lado foi evidenciado também que as raízes das plantas influenciam o solo adjacente às mesmas (rizosfera) afetando a taxa de absorção de nutrientes e a população microbiana (BARBER, 1984).

A absorção relativa de cátions e ânions pelas raízes determina se H^+ ou OH^- são liberados pelas raízes. Quando o N é aplicado ao solo em forma de NH_4^+, as raízes o absorvem e liberam H^+ para a rizosfera, deixando-a mais ácida. Se o N é aplicado em forma de NO_3^-, as raízes o absorvem e liberam OH^-, elevando o pH na interface raiz-solo (BARBER, 1971).

RILEY & BARBER (1971) constataram que reduções no pH da rizosfera, induzidas pelo suprimento de N predominantemente na forma de NH_4^+, aumentou a absorção de fosfato por soja, provavelmente devido a redução do pH da rizosfera, o que aumentou a disponibilidade do P. Inversamente as plantas de soja supridas com NO_3^- aumentaram o pH da rizosfera e assim reduziram a disponibilidade do P. SMILEY (1974)

também encontrou que o pH na rizosfera de plantas de trigo foi mais baixo que o pH inicial do solo quando o N foi suprido predominantemente na forma de NH_4^+. Diferenças de 2,2 unidades no pH foram constatadas em experimentos de vasos e de até 1,2 unidades em experimentos de campo.

2.3.8. Teores de nutrientes no solo

A absorção de nutrientes pelas raízes das plantas depende da morfologia e taxa de crescimento do sistema radicular, das características de absorção de nutrientes pelas raízes e das características de suprimento de nutrientes do solo (CLAASSEN & BARBER, 1976). As características do solo em suprir os nutrientes às raízes, envolve, basicamente, a concentração inicial do nutriente na superfície da raiz e a capacidade do solo (poder tampão) em manter esta ou determinada concentração (BARBER, 1974).

Como foi visto anteriormente, para que os nutrientes possam ser absorvidos pela planta, é necessário seu deslocamento da solução próxima a fase sólida do solo até a superfície da raiz, o que ocorre através dos processos de difusão e fluxo de massa. Fatores que afetam a concentração do nutriente na solução estarão também afetando o seu transporte até a superfície das raízes. O poder tampão é frequentemente o fator que tem mais influência sobre o coeficiente de difusão, principalmente dos íons que são fortemente adsorvidos pelas partículas de solo (NYE & TINKER, 1977).

Em adição a concentração do nutriente na solução e ao poder tampão, o conteúdo de água do solo, o fator tortuosidade, a superfície e distribuição das raízes, e o fator de exclusão de ânions (BARBER, 1974) são importantes para aqueles nutrientes que chegam às raízes das plantas por difusão, como o fósforo e o potássio.

O tamanho e a forma do sistema radicular influenciam quantitativamente a taxa e o modo de absorção dos nutrientes do solo e são significativamente afetados pelo suprimento de nutrientes (BARLEY, 1970). ATKINSON (1973) relata que a deficiência de fósforo causou um aumento da relação (em peso) raiz : parte aérea em 45 espécies estudadas. ANGHINONI & BARBER (1980a) constataram que a medida que aumentavam os níveis de P no solo decrescia o comprimento de raízes e sua taxa de crescimento, em plantas jovens de milho, observando também que houve uma tendência ou significativo decréscimo no peso seco das raízes a medida que diminuia a fração fertilizada do solo.

HALMARK & BARBER (1981), estudando os efeitos de níveis de K e de densidades do solo em soja, observaram que aumentando o teor de K no solo aumentou o crescimento das raízes e desenvolvimento da parte aérea mas teve um efeito variável no influxo líquido e no teor de K, Ca e Mg nas plantas. O aumento da densidade do solo reduziu o crescimento das raízes, da parte aérea e a concentração dos nutrientes no tecido, mas aumentou o seu influxo líquido. A adição de K ao solo contribuiu favoravelmente para diminuir o efeito negativo da

compactação do solo em diversos parâmetros de planta medidos.

BREWSTIER et alii (1976) conduziram experimento com colza (*Brassica napus*), cultivada em solução nutritiva, em quatro concentrações de fósforo e colhidas a 5, 10 e 15 dias após o transplante. Com 15 dias as raízes das plantas, em solução com baixa concentração de P, apresentaram menor comprimento, eram mais finas e com abundância de pelos radiculares. Com o aumento da concentração de P na solução,as raízes engrossaram e apresentaram maior comprimento radicular, com pelos radiculares rudimentares ou ausentes. A taxa de absorção de P diminuiu com a idade das plantas para todas as concentrações de P. Também foi observado que nos primeiros cinco dias de cultivo as plantas apresentaram um rápido desenvolvimento sendo grandes as concentrações de P no tecido. Após este período o teor de fósforo no tecido decresceu rapidamente devido a um aumento na relação do peso seco parte aérea : raiz e pela limitação no suprimento de P às raízes.

Trabalho semelhante foi conduzido por KHASAWNEH & COPELAND (1973), com algodão em câmara de crescimento. Estes autores também observaram redução na taxa de absorção de P com a idade das plantas. Em ausência de P, o comprimento radicular foi de 500 m e a absorção de 35 mg de P em um período de oito semanas de cultivo. As plantas que cresceram em solo altamente fertilizado com P, apresentaram os mesmos 500 m de raízes e absorção de 35 mg de P em um menor

período de tempo; ao final de oito semanas o comprimento radicular foi próximo a $2,0 \times 10^3$ m, com absorção superior a 200 mg de P. Em baixas concentrações de P as plantas apresentaram baixa taxa de absorção de P e baixa taxa de crescimento de raízes, não desenvolvendo um sistema radicular capaz de absorver P em quantidades que atendessem as necessidades das plantas.

BALIGAR & BARBER (1978) observaram em dois de quatro solos estudados que a adição de K reduziu o comprimento radicular de plantas de milho com 16 dias de idade. A aplicação de 100 ppm de K aos solos teve pequeno efeito no raio médio de raízes; a taxa de crescimento das raízes (k) tanto nos solos não fertilizados como nos fertilizados com K, foi maior no período de 4 a 10 dias de cultivo, devido ao rápido crescimento radicular decorrente do corte das raízes por ocasião do transplante. Do 10 ao 16º dia a adição de K fez decrescer a taxa de crescimento radicular. O influxo de K diminuiu com a idade das plantas e aumentou com a fertilização de K no solo. Em estudos de absorção de K por milho em solos no Rio Grande do Sul, GIANELLO (1978) constatou que no solo Santo Ângelo o comprimento das raízes não foi afetado pelo aumento do teor de K em solução deste solo, enquanto que no solo Cruz Alta, com baixa concentração de K em solução, houve um acréscimo significativo no comprimento das raízes.

Com o aumento da concentração de K na solução de 6 para 100 µM, CLAASSEN & BARBER (1977) observaram que o teor

de K na parte aérea de milho com 17 dias de idade, aumentou de 3,11 para 8,20%. O aumento da concentração de K na parte aérea provocou um decréscimo do Imax de 2,5 vezes. Neste mesmo experimento estes autores também constataram que reduzindo a proporção do sistema radicular supridas com K, a sua concentração na parte aérea diminuiu de 7,64% para 3,26%, tendo o influxo do K aumentado de 12 µmoles para 31 µmoles/grama (de peso fresco de raiz) por segundo x 10^4, evidenciando a existência de uma relação curvilinear inversa entre a % de K na parte aérea e o influxo máximo de K na raiz. Parece existir um mecanismo de retroalimentação entre a parte aérea e o sistema radicular; quando a parte aérea está deficiente em K, aumenta o fluxo de entrada de potássio (BARBER, 1982).

Quando o teor do nutriente no solo é baixo sua absorção pelas plantas será baixa, não devido a habilidade da planta para absorver o nutriente mas pela limitação imposta pelo suprimento do solo. Nesta situação outro mecanismo envolvendo as características de crescimento da raiz é ativado (ANGHINONI & BARBER (1980a). ATKINSON (1973), BREWSTER et alii (1976), POWEL (1974), SHENK & BARBER (1979) observaram que a deficiência de P causou um incremento da relação (em peso) raiz/parte aérea em 45 espécies ou um decréscimo na relação área superficial de raízes/peso da parte aérea. Segundo estes autores a capacidade das plantas em reduzir o raio da raiz em vez de aumentar o seu peso sob condições de deficiência de P parece ser um mecanismo de compensação para

incrementar a área superficial por unidade de peso de raiz, promovendo desta forma o suprimento de P à parte aérea.

A presença de elementos tóxicos no solo pode afetar sensivelmente a absorção de outros nutrientes e a morfologia do sistema radicular. A toxidez de alumínio, comum em solos ácidos, reduz o crescimento das raízes principais tornando-as grossas, entumecidas, tortuosas e pardas. As secundárias são pouco numerosas com desenvolvimento limitado e ausência de pelos radiculares, tendo como conseqüência pouca eficiência na absorção de água e nutrientes (FLEMING & FOY, 1968; CLARK, 1977; CANAL, 1980). A presença de Ca diminui o efeito da toxidez do Al em raízes e a intensidade deste efeito está em função da relação Ca/Al (FOY et alii, 1969). CANAL & MIELNICZUK (1983), estudando parâmetros de absorção de potássio em milho afetados pela interação alumínio-cálcio, encontraram que o Al não afetou os parâmetros de absorção de K, Imax, Km e Cmin, constando que o Imax, quando expresso por área de raiz aumentou em 30% na presença de 1 ppm de Al na solução. Observaram que o Al reduziu o crescimento radicular, tornando as raízes mais grossas e pouco ramificadas. Os resultados indicaram que o maior efeito Al sobre a absorção de K foi na redução do sistema radicular.

Toxidez de manganês ocorre com menor freqüência do que a toxidez de alumínio, já que as plantas podem tolerar altos níveis de manganês solúvel. A toxidez de manganês geralmente afeta mais a parte aérea das plantas do que a raiz (FOY, 1974).

2.4. Modelos de absorção de nutrientes

A absorção de nutrientes pelas plantas depende não só do suprimento pelo solo mas também de características de absorção da própria planta, relacionadas à morfologia e taxa de crescimento do sistema radicular e os parâmetros cinéticos de absorção (Imax, Km e Cmin).

Estes parâmetros têm sido usados, na maioria das vezes isoladamente, para explicar a absorção de nutrientes pelas plantas, obtendo resultados significativos ou não em função das características dos solos ou grupos de solos trabalhados.

Atualmente modelos matemáticos tem sido desenvolvidos para descrever o fluxo de nutrientes através do solo para as plantas. Desde o modelo proposto por BOULDIN (1961) para descrever a difusão de íons para as raízes das plantas, muitos pesquisadores têm incluído novas variáveis nos modelos propostos. Estes foram revistos por OLSEN & KEMPER (1968), BARLEY (1970) e HELYAR & MUNNS (1975) conforme citados por CLAASSEN & BARBER (1976). Somente o modelo de BREWSTER et alii (1975) foi usado para relacionar a absorção predita com a observada durante o crescimento das plantas. CLAASSEN & BARBER (1976) desenvolveram um modelo matemático para estimar a absorção de K pelas raízes de milho. Um programa de computador foi desenvolvido para a solução do modelo matemático. Os parâmetros utilizados no modelo foram: I) do solo: o coeficiente de difusão efetivo (De);

concentração inicial do nutriente na solução do solo (Cli) e poder tampão do solo (b); II) da planta: a relação entre a concentração do nutriente na solução e o influxo líquido para as raízes; influxo de água, raio médio das raízes, seu comprimento inicial e sua taxa de crescimento.

A absorção de K calculada pelo modelo correlacionou-se significativamente (R^2 = 0,87) com a efetivamente observada. A absorção calculada foi superestimada em 50%, possivelmente devido a competição ocorrida entre as raízes pela absorção de K do solo e sua absorção ter sido mais rápida durante a noite (CLAASSEN & BARBER, 1976).

ANGHINONI & BARBER (1980b) avaliaram o modelo de CLAASSEN & BARBER (1976) comparando o P absorvido por plantas de milho com 18 dias de idade com o predito pelo modelo encontrando alta correlação (r = 0,85) entre ambos. Resultados similares foram obtidos por SCHENK & BARBER (1979) também com milho em câmara de crescimento. Em experimento de campo com hibridos de milho estes autores também encontraram alta correlação (r = 0,98) entre o P absorvido pelas plantas e o predito pelo modelo.

Recentemente BARBER & CUSHMAN (1981) desenvolveram um modelo mecanístico para predizer a absorção de nutrientes pelas plantas. O modelo mecanístico difere de um modelo de regressão, onde os coeficientes são obtidos estatisticamente, porque as equações que descrevem o fluxo de nutrientes são combinadas com equações que descrevem o crescimento da planta. No modelo de BARBER & CUSHMAN (1981) foi

incluido, além dos 10 parâmetros anteriores, mais uma variável r_1, que expressa a meia-distância entre o eixo das raízes.

Os modelos de CLAASSEN & BARBER (1976) e de BARBER & CUSHMAN (1981) foram testados em uma série de experimentos em vasos com variadas espécies e solos. Os resultados de experimentos de campo obtidos por SHENK & BARBER (1980) com milho e de SILBERBUSH & BARBER (1984) com soja, indicam que os modelos podem ser usados satisfatoriamente tanto em experimentos em vasos como a campo para predizer a absorção de nutrientes pelas plantas (BARBER, 1984).

Recentemente ITOH & BARBER (1983) desenvolveram um programa com o objetivo de calcular a absorção adicional de nutrientes devido ao efeito dos pelos radiculares,desde que a sua presença em solos com baixos níveis de P pode dobrar a taxa de absorção de fósforo.

Apesar da medida de todos os parâmetros necessários aos modelos ser muito complexa para testes rotineiros de disponibilidade dos nutrientes às plantas, os modelos podem ser utilizados como uma ferramenta de pesquisa para desenvolver sistemas de rotina que possam prever corretamente a disponibilidade dos nutrientes. O uso deste procedimento traz uma base fundamental para a avaliação da fertilidadedo solo (BARBER, 1982).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em câmara de crescimento e laboratórios da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, constituindo-se de três experimentos nos quais se estudaram os efeitos de: I) doses de potássio; II) idade das plantas e III) compactação do solo nos parâmetros de solo e de planta que afetam o suprimento de K, Ca e Mg às raízes e sua absorção por milho.

3.1. Solos

Utilizaram-se dois solos do Rio Grande do Sul, correspondentes as unidades de mapeamento Santo Ângelo (Latossolo Roxo Distrófico - Typic Haplortox) e Cruz Alta (Latossolo Vermelho Escuro Distrófico - Typic Haplortox (BRASIL, 1973).

Os solos foram caracterizados (Tabela 1), com determinações de pH em água, necessidade de calcário pelo método SMP (pH 6,0), matéria orgânica, fósforo e potássio extraíveis segundo métodos descritos por MIELNICZUK et alii (1969). A umidade gravimétrica (UG) correspondente à tensão de 0,3 bar, foi determinada conforme método descrito por FORSYTHE

TABELA 1. Classificação e algumas características físicas e químicas dos solos Santo Ângelo e Cruz Alta.

Unidade de Mapeamento[1]	Classificação[1]	Material de origem[1]	Matéria orgânica[2]	K[2]	P[2]	pH[2]	Necessidade de calcário[2]	Umidade gravim. (0,3 bar)[3]
			---- % ----	-- ppm --			--- t/ha ---	-- % --
Santo Ângelo	Latosol Roxo Distrófico	Eruptivas Básicas	6,0	440	4,6	5,4	3,8	36,5
Cruz Alta	Latosol Vermelho Escuro Distrófico	Arenito e Basalto	2,6	35	3,0	5,3	5,0	15,4

[1] BRASIL, 1973.

[2] MIELNICZUK et alii, 1969.

[3] FORSYTHE, 1975.

(1975).

Foram realizados ensaios prévios para a determinação da capacidade de retenção de umidade pelos solos em diferentes níveis de compactação. Para tal os solos com umidade equivalente a 70% da UG foram acomodados em diferentes densidades (Apêndice 1 e 2), em colunas de vidro de 6 cm de diâmetro por 30 cm de altura, tendo na extremidade inferior uma tela plástica. Os solos foram saturados com água permanecendo em equilíbrio por 48 horas, após o qual retirou-se amostras de cada solo que foram pesadas, secas em estufa a 105°C por 24 horas e novamente pesadas. Pela diferença de pesagem determinou-se curvas de capacidade de retenção de umidade (Apêndice 1 e 2), usando-se estes valores nos tratamentos em que foram aplicados os níveis de compactação.

3.2. Preparo dos solos

Após a coleta a campo, os solos foram secos ao ar e tamisados em peneira de 4,76 mm e tratados com uma mistura de $CaCO_3$ e $MgCO_3$, relação molar 3 : 1, em doses para elevar o pH a 6,0, e incubados por três meses, com umidade equivalente a 80% da capacidade de campo. Após os solos receberam em solução 3 µg/g de Zn ($ZnSO_4 \cdot 7\ H_2O$), 1 µg/g de B(H_2BO_3), 1 µg/g de Cu ($CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$), 0,25 µg/g de Mo($(NH_4)_6\ Mo_7\ O_{24} \cdot 4\ H_2$). O solo Santo Ângelo recebeu 200 µg/g de P e o Cruz Alta 100 µg/g de P, tendo como fonte o $NH_4 \cdot H_2PO_4$. A quantidade de N aplicado aos solos foi

de 100 µg/g, usando-se o sulfato de amônio ($SO_4(NH_4)_2$), subtraindo-se as quantidades fornecidas junto com a aplicação de P e Mo.

No experimento I, de doses de K, em que foi utilizado o solo Cruz Alta, foram adicionados níveis de 0, 50, 100 e 150 µg/g de K (K_0, K_1, K_2 e K_3), na forma de KCl em solução.

Após a aplicação destes tratamentos, foi corrigida a umidade dos solos para 80% da capacidade de campo e incubados por dois meses. Devido a aplicação de corretivos e a formação de nitratos, procedeu-se a lavagem dos solos para remover o excesso de sais na solução.

3.3. Lavagem dos solos

Para lavagem os solos foram colocados em baldes plásticos com capacidade para 20 litros, colocando-se na parte inferior uma camada de lã de vidro e outra de papel filtro para facilitar a percolação da água e reter as partículas de solo. O solo foi mantido em equilíbrio com água destilada por duas horas, na proporção solo água 1:1. Após este período deixou-se a água percolar livremente através de um orifício existente no fundos dos baldes.

Os solos foram removidos dos baldes, secos ao ar e passados em peneira de 6 mm de abertura. Após foi realizada a montagem dos vasos, sendo retirada amostras de solo de cada tratamento para posterior análise de cátions trocáveis

e em solução.

3.4. Preparo dos vasos

Os solos foram colocados em vasos de 12,5 cm de diâmetro e 30 cm de altura, revestidos internamente com sacos plásticos (Figura 3). Para os experimentos I e II utilizou-se um volume de solo equivalente a 2,4 l de solos, acomodados nas densidades apresentadas no Apêndice 3.

Para o experimento III, de compactação do solo, as densidades usadas foram obtidas pela redução para 80% do volume de poros medidos na densidade normal. Para tal, colocou-se nos vasos 1/4 da massa total do solo, por vez, sendo a compactação realizada utilizando-se um "martelo de compactação" com peso de 3140 g em queda livre de 80 cm de altura (Apêndice 3).

No centro de cada vaso dos experimentos I e II foi colocado um segmento de mangueira plástica de 1 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento, fechado ao fundo e perfurado radialmente, para forçar uma distribuição mais uniforme da água nos vasos após a irrigação.

Foram preparados quatro vasos por tratamento, sendo um deles deixado sem plantas para o controle diário de evaporação da água do solo.

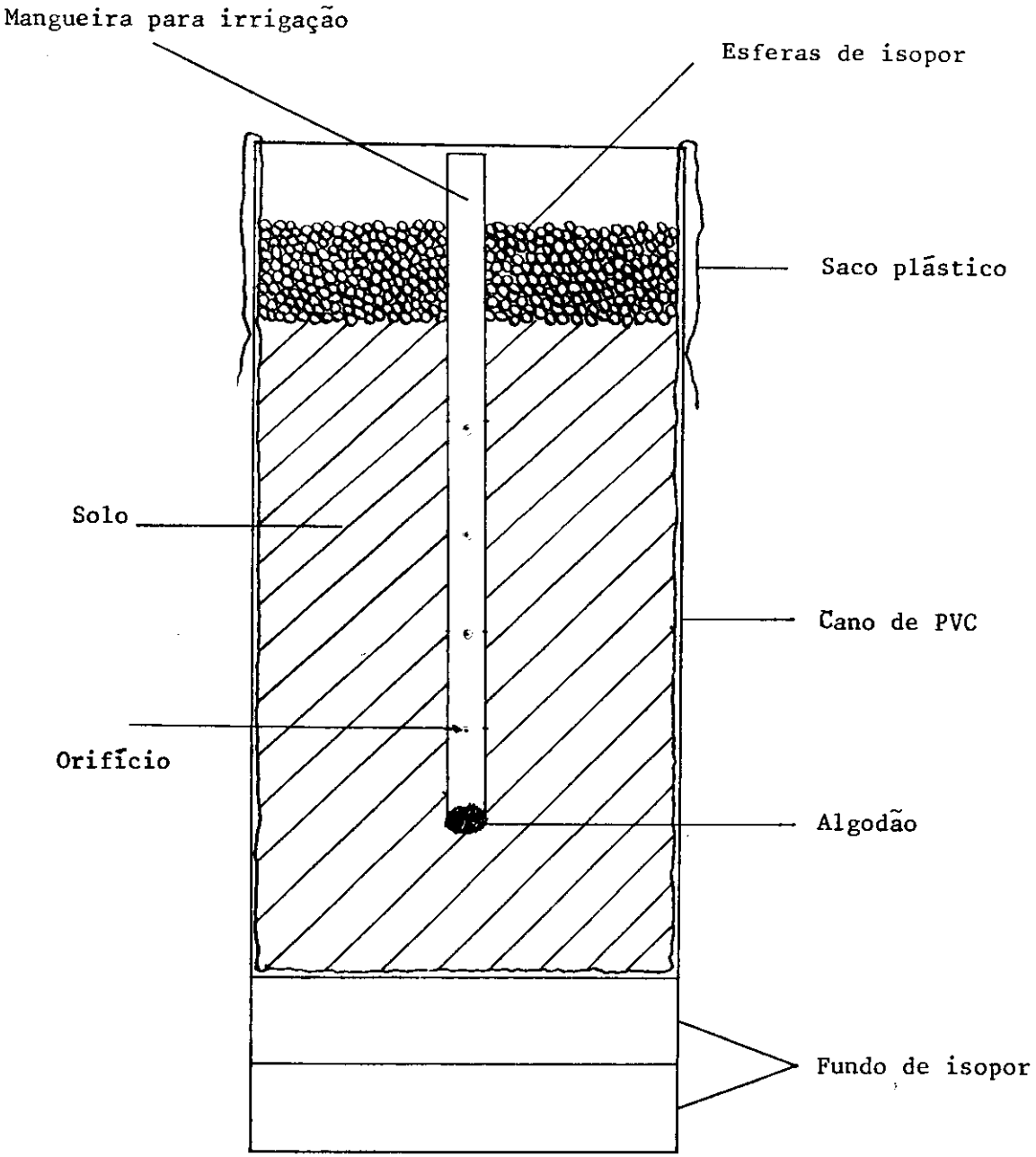


FIGURA 3. Corte do vaso utilizado para o cultivo de milho. (Escala 1:2).

3.5. Pré-germinação e transplante

Sementes de milho híbrido AG-64, foram colocadas em cartuchos de papel filtro e pré-germinadas em solução de nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), 0,67 mM. Após seis dias, as plântulas foram retiradas do papel filtro e selecionadas as mais vigorosas e uniformes. Vinte plântulas foram separadas para determinações de características químicas e morfológicas. Os resultados são apresentados no Apêndice 5. O restante das plântulas tiveram suas raízes cortadas a 5 cm da base do hipocótilo, realizando-se a seguir o transplante (4 plantas/vaso), em três dos quatro vasos previamente preparados.

A umidade mantida nos vasos dos experimentos I e II foi a equivalente a umidade gravimétrica (0,3 bar) e no caso do experimento III, de compactação, a capacidade de campo correspondente à umidade retida em cada densidade (Apêndice 4).

Para reduzir perdas de água por evaporação e a formação de uma crosta superficial endurecida pelo ressecamento do solo, após o transplante a parte superior dos vasos foi coberta com uma camada de 4 cm de espessura, de esferas de isopor com diâmetro de 5 a 7 mm.

3.6. Cultivo

O cultivo foi feito em câmara de crescimento, utilizando-se um comprimento de dia de 14 horas e uma temperatura

diurna de 25°C e noturna de 22°C. A umidade do ar permaneceu em torno de 70% à noite, decrescendo para 65% durante o dia. A intensidade luz, medida à superfície do solo foi de 15.000 lux ($1,54 \times 10^{-4}$ cal.$cm^{-2}m^{-1}$).

O estudo consistiu de três experimentos sendo os cultivos realizados em duas etapas. Na primeira o milho foi cultivado por um período de 15 dias utilizando-se o solo Cruz Alta tratado com quatro níveis de K (experimento I). Na segunda etapa utilizou-se os solos Santo Ângelo e Cruz Alta para os experimentos II e III. No experimento II o milho foi cultivado por 17 dias após o transplante, realizando-se cortes em três épocas distintas de crescimento aos 7, 13 e 17 dias de idade; no experimento III os solos foram tratados com dois níveis de compactação e neles o milho foi cultivado por 17 dias, sendo o corte realizado na mesma data da última época do experimento II.

Com o objetivo de reduzir a transpiração e o stress causado pelo transplante, nos dois primeiros dias após o transplante, os vasos foram cobertos com sacos plásticos cortados nos cantos. Destes dois dias, os vasos permaneceram um dia na ante-câmara e um dia na câmara de crescimento. Em seguida se procedeu a distribuição dos vasos em delineamento completamente casualizado, sendo deixado para cada tratamento um vaso sem plantas para o controle da evaporação da água do solo. Cada tratamento teve três repetições.

Para os experimentos I e II, de doses de K e de períodos de crescimento, respectivamente, o nível de umidade

foi corrigida para a umidade gravimétrica (0,3 bar) e mantida até a colheita. No experimento III, de compactação do solo, a umidade mantida foi a equivalente a capacidade de campo na densidade considerada. A correção de umidade foi realizada diariamente por diferença de peso, utilizando-se água destilada. O conteúdo de água adicionada foi anotado para cálculo da quantidade de água transpirada pelas plantas, obtida subtraindo a quantidade de água perdida por evaporação dos vasos sem plantas, do total de água evapotranspirada dos vasos com plantas.

No oitavo dia de cultivo do milho, foi realizada para os experimentos II e III, a aplicação de 30 ppm de N em solução, na forma de uréia.

Após os cortes a parte aérea foi seca em estufa a 60°C por 72 horas. Determinou-se o peso da matéria seca e o tecido foi moído até passar por peneira com 20 malhas/pol.^{2} e acondicionado para posterior análise.

As raízes foram separadas dos solos, lavadas e secas em papel toalha para retirar a água aderida. Determinou-se o peso úmido e o volume de raízes foi calculado considerando que as raízes frescas têm densidade específica igual a 1,0 g/cm^3 (HALMARK & BARBER, 1981). Retirou-se amostras de raízes de cada tratamento que foram pesadas e colocadas em solução de tolueno 1% e guardadas sob refrigeração para posterior medição do comprimento. O restante foi seco em estufa a 60°C por 72 horas, pesado, moído, passado em peneira de 20 malhas/pol.^{2} e acondicionado para posterior análise.

Após a separação das raízes mais grossas, que eram facilmente visualizadas, retirou-se uma amostra de solo de cada tratamento que foi guardada sob refrigeração para posterior separação de raízes finas. Para a separação das raízes finas do solo, a amostra de solo foi colocada sobre peneira com malha de 0,76 mm de abertura e imersa em água. As raízes finas foram catadas com o auxílio de lupa e pinça e colocadas em frascos contendo solução de tolueno a 1%. Após foram guardadas sob refrigeração para posterior medição do comprimento.

O restante do solo foi seco ao ar e acondicionado para posterior determinação dos teores de cátions trocáveis e em solução pós cultivo.

3.7. Análise do solo

3.7.1. K, Ca e Mg trocáveis

Em amostras de solo coletadas antes e após os cultivos determinou-se os teores de K, Ca e Mg trocáveis em acetato de amônio (NH_4OAc), 1N a pH 7,0, conforme métodos descritos por ISAAC & KERBER (1971). Os teores de K foram determinados no fotômetro de chama e Ca e Mg no espectrofotômetro de absorção atômica.

3.7.2. K, Ca e Mg solução

Os extratos para determinação dos teores em solução de K, Ca e Mg, foram obtidos conforme método de deslocamento descrito por ADAMS (1974).

Para o deslocamento foram usadas colunas de PVC, com 30 cm de altura e 2,8 cm de diâmetro. No fundo de cada coluna foi colocado um funil coletor e sobre este, uma camada de lã de vidro e papel filtro, com a finalidade de reter as partículas de solo durante o processo de deslocamento. Os solos foram acomodados nas colunas, nas densidades especificadas no Apêndice 3. Após a montagem das colunas, elevou-se a umidade dos solos para a capacidade de campo, permanecendo em equilíbrio por 24 horas, após o qual iniciou-se o deslocamento da solução do solo com KCNS 0,5%. Os primeiros 5 ml da solução deslocada foram descartadas. Pela reação do deslocante KCNS com $FeCl_3$, que forma um complexo ferrocianeto de coloração vermelho escuro, era indicado o fim do deslocamento, evitando-se a contaminação dos extratos com o KCNS.

Nos extratos foram determinados o K em solução no fatometro de chama e Ca e Mg no espectrofotômetro de absorção atômica (ISAAC & KERBER, 1971).

3.8. Análise do tecido

Para a determinação de K, Ca e Mg no tecido foram pesadas 200 mg de tecido moído da parte aérea e de 100 a

200 mg de tecido moído de raízes, conforme a disponibilidade, uma vez que para as primeiras épocas de corte (experimento II) as plantas possuiam um sistema radicular pequeno.

O tecido foi queimado a 550°C e tratado com HNO_3 2,5N, conforme método descrito por ISAAC & KERBER (1971). O K no extrato foi determinado no fotômetro de chama e o Ca e Mg no espectrofotômetro de absorção atômica.

3.9. Cálculos

Os cálculos das contribuições dos mecanismos de suprimento de K, Ca e Mg às raízes das plantas foram obtidos conforme as pressuposições apresentados por OLIVER & BARBER (1966).

Foi considerado que a quantidade máxima de íons que poderiam ser supridos às plantas pelo mecanismo de intercepção radicular como sendo aquela disponível num volume de solo igual ao ocupado pelas raízes. Assim, obteve-se a contribuição do mecanismo de intercepção radicular pela quantidade de íons trocáveis (média de antes e após o cultivo) contidos num volume de solo igual ao volume de raízes. A contribuição do fluxo de massa foi obtida pelo produto da quantidade de água absorvida pelas plantas e pelos teores médios de íons na solução do solo, obtidos antes e após cada período de cultivo. Obteve-se a contribuição da difusão subtraindo-se a quantidade total de íons absorvidos das quantidades supridas por intercepção radicular e fluxo de massa.

Para avaliação do comprimento radicular, foi utilizado o método de NEWMAN modificado, descrito por TENNANT (1975). O volume de raízes foi calculado atribuindo-se a elas a densidade igual a 1,0 g/cm^3. O raio de raízes (r), foi calculado de:

$$r = (V/\pi L)^{1/2}$$

onde: L = comprimento de raízes

V = volume de raízes

A área superficial de raízes (A), calculada de $A = 2\pi rL$ (HALMARK & BARBER, 1981).

A taxa de crescimento de raízes (k), foi calculada conforme a equação apresentada por BALIGAR & BARBER (1979):

$$k = (\ell n\ L_2 - \ln L_1)/(t_2 - t_1)$$

onde: L_1 = comprimento de raízes no tempo t_1

L_2 = comprimento de raízes no tempo t_2

O influxo de nutrientes (In) do início ao fim de cada cultivo, foi determinado pela equação de WILLIAMS (1948).

$$In = \{\ell n\,(A/A_0)/(A-A_0)\}\ .\ \{(U-U_0)/(t-t_0)\}$$

onde: A_0 = área superficial de raízes no tempo t_0

A = área superficial de raízes no tempo t_1

U_0 = quantidade do nutriente absorvido no tempo t_1

U = quantidade do nutriente absorvido no tempo t_2

A taxa de absorção de água (U_0), foi determinada utilizando-se também a equação de WILLIAMS (1948), substituindo-se o termo U e U_0 por W e W_0, respectivamente, onde: W_0 = cm^3 de água absorvida durante o tempo t_1 e W_1 = cm^3 de água absorvida durante o tempo t_2.

Os resultados apresentados no experimento I,para as três idades do milho (1-7, 8-13 e 14-17 dias), foram estimados pela diferença entre os resultados encontrados no cultivo do milho por 7, 13 e 17 dias nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento I - Doses de K

Neste experimento foram avaliados os efeitos de quatro doses de K adicionadas ao solo Cruz Alta, na morfologia de raízes, no suprimento e na absorção de K, Ca e Mg por plantas de milho.

4.1.1. Mecanismos de suprimento de K, Ca e Mg às raízes do milho

4.1.1.1. Suprimento de K

A contribuição dos mecanismos de suprimento de K às raízes do milho são apresentados na Tabela 2. O principal mecanismo que supriu este nutriente às raízes foi a difusão contribuindo com 80,8 a 89,6% do K absorvido pelas plantas, mesmo nos casos em que os teores de K no solo foram mais elevados (Apêndice 6). O fluxo de massa, em termos relativos, supriu, no máximo 17,7% do K absorvido pelas plantas.

A contribuição da intercepção radicular para todas as doses de K aplicados ao solo, foi inferior a 2,0%, mostrando a pouca significância deste mecanismo no suprimento

TABELA 2. Absorção de K pelo milho e quantidades supridas às raízes por intercepção radicular, fluxo de massa e difusão, durante 15 dias de cultivo no solo Cruz Alta com quatro doses de K (médias de três repetições).

K adicionado	K absorvido pelas plantas[1/]	Intercepção radicular	Fluxo de Massa	Difusão
------- µg/g -------	---------- mg/vaso ----------			
0	56,0	0,61 (1,1)[2/]	5,2 (9,3)	50,2 (89,6)
50	148,7	1,45 (1,0)	13,1 (8,8)	134,2 (90,2)
100	175,6	1,85 (1,1)	21,2 (12,2)	152,5 (86,7)
150	179,9	2,77 (1,5)	31,6 (17,7)	145,5 (80,8)
Média	140,1	1,67	17,8	120,6
DMS 5%	25,6	0,38	2,3	25,9
CV %	9,68	12,1	6,84	11,4

[1/] Raiz mais parte aérea.

[2/] Os números entre parênteses indicam a contribuição percentual de cada mecanismo na quantidade de K absorvido.

de K para o milho.

Estes resultados são semelhantes aos obtidos por BARBER (1966) que constatou que o mecanismo de difusão supriu de 71 a 93% do K absorvido pelas plantas e por VARGAS et alii (1983) que verificaram que a difusão foi também o principal mecanismo de transporte de K às raízes de milho contribuindo em média com 89,1% da quantidade absorvida pelas plantas em amostras de doze solos do Rio Grande do Sul com diferentes níveis de fertilidade. Estes autores apontaram a possibilidade de que a aplicação de doses elevadas de K principalmente em solos com baixo poder tampão, poderia aumentar a contribuição do fluxo de massa pelo aumento da concentração deste íon em solução e conseqüentemente reduzindo a quantidade suprida por difusão. Isto não ocorreu de forma expressiva neste trabalho.

Conforme apresentado no item 2.1, teores de 50 µg/ml de K na solução do solo seriam suficientes para que todo o K absorvido fosse suprido por fluxo de massa. O aumento das doses de K de 0 para 150 µg/g aumentaram o teor médio de K em solução de 9,4 para 62,2 µg/ml (Apêndice 6), o que teoricamente seria suficiente para fazer com que o fluxo de massa suprisse, se não todo, mas a maior parte do K absorvido. Deve se considerar, entretanto, que a taxa de transpiração do milho foi no máximo de 145 ml/g de matéria seca (Tabela 3) e os teores de K no tecido foram de até 4,44% (Tabela 7). Assim, em plantas jovens de milho para o fluxo de massa suprir todo o K que a planta absorve, o teor de K na solução

TABELA 3. Produção de matéria seca, volume de raízes, taxa de absorção de água e taxa de transpiração por planta de milho, após 15 dias de crescimento, no solo Cruz Alta com quatro níveis de K adicionados.

K adicionado	Produção de matéria seca			Volume de raízes	Taxa de absorção de água	Taxa de transpiração
	Raiz	Parte aérea	Total			
--- µg/g ---	-------- g/vaso --------			--- cm^3/vaso ---	$cm^3 . cm^{-2} . s^{-1} \times 10^6$	ml/g de tecido
0	1,12	2,76	3,88	15,65	0,94	142
50	1,34	3,09	4,43	18,06	0,96	134
100	1,40	3,36	4,76	17,55	1,00	127
150	1,25	3,06	4,31	16,05	0,95	118
Média	1,28	3,07	4,35	16,83	0,96	130
DMS 5%	NS	NS	NS	NS	NS	10
CV %	10,8	7,24	8,05	9,73	5,27	4,22

TABELA 4. Teores de K, Ca e Mg no tecido (raiz e parte aérea) do milho, após 15 dias de cultivo no solo Cruz Alta, com a aplicação de quatro doses de potássio (médias de três repetições).

K adicionado	Concentração no tecido					
	K		Ca		Mg	
	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea
--- µg/g ---	---------- % ----------					
0	1,06	1,60	0,86	2,38	0,47	1,10
50	2,51	3,75	0,83	1,77	0,47	0,61
100	2,82	4,07	0,64	1,56	0,31	0,49
150	3,53	4,44	0,59	1,32	0,27	0,39
Média	2,48	3,47	0,73	1,76	0,38	0,65
DMS 5%	0,42	0,25	0,11	0,15	0,06	0,08
CV %	9,04	3,81	7,79	4,67	8,15	6,59

deveria estar próximo a 310 µg/ml ou seja, cinco vezes superior ao obtido com a aplicação de 150 µg/g de K. Em período mais adiantado de crescimento, em que a taxa de transpiração aumenta e o teor de K no tecido diminui, é possível que haja uma maior contribuição do fluxo de massa no suprimento de K às raízes.

Como o suprimento por intercepção radicular e por fluxo de massa supriram menos de 20% do K absorvido pelas plantas, foi atribuído à difusão, calculada pela diferença entre o absorvido e o suprido pelos outros dois mecanismos, a maior parte do K suprido às plantas em todas as doses de K aplicados ao solo. Possivelmente a grande absorção de potássio neste período inicial de crescimento do milho, que favorece a "depleção" do K junto a superfície radicular, os altos teores de K em solução nas doses mais altas de potássio e a baixa taxa de transpiração das plantas (que não favoreceu o fluxo de massa) tenham contribuído para a predominância do mecanismo da difusão num solo de textura média como o Cruz Alta, de baixo poder tampão, onde se aplicou até 150 µg/g de K (360 kg/ha de K_2O).

Ainda, o alto teor de umidade (capacidade de campo), deve ter reduzido a tortuosidade do caminho difusivo, aumentando a área de secção transversal disponível para a difusão, fator A (BARBER, 1974) e reduzindo a viscosidade da água, favorecendo também a difusão do K até as raízes (OLSEN & KEMPER, 1968).

4.1.1.2. Suprimento de Ca

Devido às altas concentrações de Ca no solo (Apêndice 7), o seu suprimento às raízes ocorreu por intercepção radicular e, principalmente, por fluxo de massa, em quantidades superiores à absorvida pelas plantas, ocasionando possivelmente acúmulo do elemento próximo às raízes (Tabela 5).

A literatura não relata trabalho em que tenha ocorrido suprimento de Ca por difusão o que não ocorreu também neste estudo. Há casos em que todo o Ca foi suprido por intercepção radicular (OLIVER & BARBER, 1966b), e em todos, grande quantidade de Ca acumulou-se próximo às raízes, inclusive com formação de "tubos petrificados" de carbonato de cálcio (BARBER, 1974). Em amostras de doze solos do Rio Grande do Sul, VARGAS et alii (1983), encontraram variação no suprimento de Ca por fluxo de massa de 24,2 a 92,5%, proporcional ao teor de cálcio presente nos solos em estudo.

A redução da absorção de Ca com o aumento das doses de K no solo foi possivelmente devida a interação destes elementos o que concorda com trabalhos de BECKETT (1964), WALLACE et alii (1948) e BASSO (1976).

4.1.1.3. Suprimento de Mg

As contribuições da intercepção radicular, do fluxo de massa e da difusão no suprimento de Mg para as raízes de

TABELA 5. Absorção de Ca pelo milho e quantidades supridas por intercepção radicular e fluxo de massa durante 15 dias de cultivo, no solo Cruz Alta com quatro doses de K (médias de três repetições).

K adicionado	Ca absorvido pelas plantas[1/]	Intercepção radicular	Fluxo de massa	
			Absorvido	Acumulado
------ µg/g -------	---------- mg/vaso ----------			
0	74,9	12,3 (16,5)[2/]	62,6 (83,5)	154,3
50	61,9	15,3 (23,4)	49,9 (76,6)	180,4
100	60,7	14,5 (23,8)	46,2 (76,2)	204,7
150	47,5	13,5 (28,6)	34,0 (71,4)	186,6
Média	62,1	13,9	48,2	181,5
DMS 5%	8,1	NS	7,0	21,6
CV %	6,94	9,67	7,7	6,31

1/ Raiz mais parte aérea.

2/ Os números entre parênteses indicam a contribuição percentual de cada mecanismo na quantidade de Ca absorvido.

milho, são apresentadas na Tabela 6. O fluxo de massa apresentou a mais alta percentagem na contribuição do suprimento de Mg para todas as doses de K, sendo sempre superior a 80%, demonstrando ter sido o principal mecanismo no transporte deste nutriente às raízes.

Com a fertilização com K, houve redução na absorção de Mg, sendo que com a adição de 150 µg/g de K, a absorção de Mg, foi menos da metade daquela em que o solo não recebeu K. As doses de K não afetaram o suprimento de Mg por fluxo de massa já que o total de Mg que chegou às raízes por este mecanismo (absorvido + acumulado), foi semelhante em todos os níveis de K. Portanto, se a quantidade suprida foi semelhante e a absorção diminuiu com o aumento do teor de K no solo, o acúmulo de Mg foi devido a menor absorção do íon pelas plantas.

O suprimento de Mg por intercepção radicular não variou significativamente com a concentração de K no solo, sendo que este mecanismo teve pequena participação no suprimento de Mg às raízes.

A difusão de Mg verificou-se no tratamento em que o solo não recebeu K, sendo resultante da maior quantidade de Mg absorvida pelo milho.

Esses resultados são semelhantes aos obtidos por VARGAS et alii (1983), que encontraram que o fluxo de massa foi o principal mecanismo de suprimento de Mg em solos do Rio Grande do Sul. A difusão de Mg ocorreu, onde foi baixa a concentração de Mg nos solos. OLIVER & BARBER (1966b) e AL-ABBAS &

TABELA 6 . Absorção de Mg pelo milho e quantidades supridas por intercepção radicular, fluxo de massa e difusão, durante 15 dias de cultivo, em solo Cruz Alta com quatro doses de K (médias de três repetições).

K adicionado	Mg absorvido pelas plantas(1)	Intercepção radicular	Fluxo de massa		Difusão
			Absorvido	Acumulado	
--- µg/g ---	----------	---------- mg/vaso ----------			
0	35,4	2,29 (6,5)(2)	28,2 (79,9)	0	4,9 (13,6)
50	25,1	2,68 (10,7)	22,4 (89,3)	6,4	0 (0,0)
100	20,5	2,32 (11,4)	18,2 (88,6)	12,1	0 (0,0)
150	15,2	2,21 (14,6)	13,0 (85,4)	15,4	0 (0,0)
Média	23,6	2,38	20,5	-	-
DMS 5%	2,6	NS	2,0	-	-
CV %	5,74	10,7	5,28	-	-

(1) Raiz e parte aérea.
(2) Os números entre parênteses indicam a contribuição percentual de cada mecanismo na quantidade de Mg absorvido.

BARBER (1964) verificaram que quando os teores de Mg em solução foram elevados, a intercepção radicular foi o principal mecanismo de suprimento deste elemento às plantas.

Neste trabalho constata-se que o único efeito que a adição de K no solo causou, foi a redução na absorção de Mg, devido a interação entre estes elementos, a exemplo do que ocorreu com o Ca.

4.1.2. Morfologia do sistema radicular

Na presença de teores mais elevados de K no solo, verificou-se diminuição no comprimento e aumento no raio de raízes, o que fez a área superficial de raízes não diferir significativamente, embora haja uma tendência de sua diminuição com a aplicação de 150 µg/g de K (Tabela 7). Como o comprimento, a taxa de crescimento de raízes também diminuiu com a fertilização com K. Resultados semelhantes foram obtidos por GIANELLO (1978) e por BALIGAR & BARBER (1978), em que a aplicação de K ao solo reduziu o comprimento radicular e a taxa de crescimento de raízes, embora os últimos autores tenham verificado pouco efeito dos tratamentos sobre o raio médio de raízes. ATKINSON (1973) e ANGHINONI & BARBER (1980a) trabalhando com P, verificaram o mesmo efeito para este nutriente sobre o comprimento radicular.

O maior comprimento de raízes onde o nível de K no solo foi baixo é, possivelmente, resultado de um mecanismo de retroalimentação entre a raiz e a parte aérea das plantas

TABELA 7. Características morfológicas de raízes, taxa de crescimento radicular e influxo de K, Ca e Mg por milho, durante 15 dias de cultivo no solo Cruz Alta, com a aplicação de quatro doses de potássio (médias de três repetições).

K adicionado	Comprimento de raízes	Raio de raízes	Área superficial de raízes	Taxa de crescimento de raízes	Influxo		
					K	Ca	Mg
--- µg/g ---	-- m/vaso --	$cmx10^{-2}$	- cm^2/vaso -	--- $\mu m/s^{-1}$ ---	-- p moles/cm^2.s --		
0	282	1,33	2360	5,82	2,42	3,17	2,46
50	276	1,44	2500	5,80	6,15	2,62	1,66
100	264	1,45	2410	5,77	7,47	2,51	1,40
150	226	1,51	2140	5,64	8,46	2,17	1,13
Média	262	1,43	2350	5,76	6,05	2,62	1,66
DMS 5%	34	0,11	NS	0,10	0,78	0,31	0,31
CV %	6,85	4,20	7,48	0,92	6,52	5,94	9,62

(ANGHINONI & BARBER, 1980a). Devido ao baixo tamponamento do solo Cruz Alta e ao pequeno período de cultivo do milho, grande parte do K que foi adicionado permaneceu na solução (Apêndice 6), não havendo necessidade de um maior crescimento radicular para explorar maior volume de solo em busca do nutriente.

Conforme sugerido por BREWSTER et alii (1976) e POWELL (1974), a redução no raio de raízes em vez do aumento de seu peso sob condições de deficiência de K parece ser uma resposta encontrada pelas plantas para incrementar a área superficial por unidade de peso de raízes, promovendo desta forma o suprimento de níveis adequados do K à parte aérea.

A presença de melhores condições de fertilidade do solo favorece a produção de maiores quantidades de fotossintatos pelas plantas (PETERSON & BARBER, 1981), o que pode ter ocasionado expansão das células do córtex, tornando-as mais largas e promovendo o aumento no diâmetro das raízes com o aumento da concentração de K no solo.

4.1.3. Absorção de K, Ca e Mg pelo milho

O aumento dos teores de K em solução resultante das aplicações de K no solo causaram aumento no influxo de K pelas raízes de 2,52 para 8,83 p moles/$cm^2.s^{-1}$ e redução no fluxo de entrada de Ca e Mg para as plantas (Tabela 7). O rendimento do milho não foi afetado pela aplicação de K no solo (Tabela 3), possivelmente devido a menor absorção de

Ca e Mg e pelos teores no tecido, principalmente do Mg, em que a aplicação de 150 µg/g de K reduziu a concentração para 0,39% comparada a 1,10% no tratamento em que não se aplicou K (Tabela 4), podendo ter ocorrido deficiência deste elemento às plantas.

Resultados semelhantes foram obtidos por BARBER (1974) e por BALIGAR & BARBER (1978), em que o aumento na concentração do K no solo provocou aumento no seu influxo para as plantas. A partir de uma certa concentração do íon na solução, a planta diminui a resposta à absorção por estar mais próxima de atingir o influxo máximo do íon. Isto parecer estar ocorrendo neste trabalho, porque embora o aumento das doses de K de 100 para 150 µg/g tenham aumentado os teores em solução de 37,5 para 62,2 ppm, pouco efeito foi verificado sobre o influxo de K que aumentou de 7,78 para 8,83 p moles/cm^2.s. ASHER & OZANNE (1967) também observaram pouco efeito sobre a absorção e rendimento das plantas, embora os teores no tecido continuaram a aumentar.

Com aumento do influxo de K e de sua concentração na parte aérea (Tabela 4), verificou-se redução no influxo de Ca e Mg, sendo maior a redução para o Mg. As percentagens de Ca e Mg na raiz quase chegaram a ser reduzidas à metade de seu valor com a aplicação de 150 µg/g de K, enquanto que o teor de Mg na parte aérea abaixou em 2,8 vezes com a adubação potássica, evidenciando que a mesma reduziu a absorção de Ca e Mg e dificultou nas translocações à parte aérea, principalmente à do Mg.

O raio de raízes influencia muito o influxo de nutrientes (PETERSON & BARBER, 1981). As raízes grossas tem maior área de membrana plasmática, nas células do cortex, por cm^2 de superfície radicular, provocando aumento no influxo de K (Tabela 7). Aqueles autores constataram que em condições de maior fertilidade as raízes engrossaram e o valor do influxo máximo foi 55% superior em relação as das raízes mais finas.

A maior densidade de raízes que ocorreu no tratamento em que não se aplicou K, juntamente com os teores mais baixos em solução, podem ter provocado competição entre as raízes para sua absorção, diminuindo o influxo de K pelas plantas.

4.2. Experimento II - Idade das plantas

Neste experimento avaliou-se a morfologia do sistema radicular, o suprimento e a absorção de K, Ca e Mg por plantas de milho, em três períodos de crescimento em dois solos. Um de textura média (Cruz Alta), com teor médio inicial de 109 µg/g de K trocável, resultante da aplicação de 100 µg/g de K e outro argiloso (Santo Ângelo), com teor nativo de 574 µg/g de K trocável.

4.2.1. Mecanismos de suprimento de K, Ca e Mg às raízes do milho

4.2.1.1. Suprimento de K

Na Tabela 8, é apresentada a contribuição quantitativa e relativa dos mecanismos de suprimento de K às raízes de milho em três períodos de crescimento das plantas, nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Apesar das difereças texturais e dos diferentes teores iniciais de K trocável e em solução (Apêndice 15), a difusão foi, em ambos os solos, o mecanismo dominante no transporte do K até a superfície das raízes, nos três períodos (idades) de crescimento das plantas. No solo Cruz Alta a difusão supriu de 88% a 90% do K absorvido pelo milho, mantendo praticamente estável sua contribuição relativa no suprimento deste íon nos três períodos de crescimento das plantas. No solo Santo Ângelo o suprimento por difusão contribuiu com 66% (nos dois períodos iniciais de crescimento das plantas), a 76% (dos 14 aos 17 dias de idade) do total do K absorvido pelo milho. VARGAS et alii (1983) em doze amostras de solos do Rio Grande do Sul encontraram que a difusão foi o principal mecanismo de suprimento de K às raízes de milho até 17 dias de crescimento, contribuindo, na média, com 72% a 95% do K absorvido pelas plantas.

O fluxo de massa supriu aproximadamente 10% do K absorvido pelas plantas no solo Cruz Alta e até 30% do total

TABELA 8. Estimativa da absorção de K pelo milho e das quantidades supridas por intercepção radicular, fluxo de massa e difusão em três períodos de crescimento das plantas nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Idade das plantas[1]	K absorvido pelas plantas[2]	Intercepção radicular		Fluxo de massa		Difusão	
------ dias -------	---------- mg/vaso ----------						
Cruz Alta							
1- 7	38,9	0,43	(1,10)[3]	4,09	(10,5)	34,4	(88,4)
8-13	81,8	0,90	(1,10)	8,71	(10,6)	72,2	(88,3)
14-17	65,1	0,62	(0,95)	6,00	(9,2)	58,5	(89,9)
Total	185,8	1,95	(1,05)	18,8	(10,2)	165,1	(88,7)
Santo Ângelo							
1- 7	47,2	1,64	(3,49)	14,4	(30,9)	31,2	(65,6)
8-13	144,0	2,75	(3,47)	46,3	(30,5)	95,0	(66,0)
14-17	201,9	0,0	(0,0)	48,7	(24,1)	153,2	(75,9)
Total	393,1	4,39	(1,18)	109,4	(27,8)	279,2	(71,0)

1/ Após transplante.

2/ Raiz e parte aérea.

3/ Percentagem relativa.

absorvido no solo Santo Ângelo, nos dois primeiros períodos de crescimento do milho. Nos dois solos, no último período de crescimento das plantas (dos 14 aos 17 dias de idade), o suprimento por fluxo de massa diminuiu pela redução dos teores do K em solução (Apêndice 15) devido a absorção pelas plantas.

A intercepção radicular foi pouco importante, tanto no solo Cruz Alta como no Santo Ângelo, para o suprimento de K às plantas.

Os resultados encontrados neste trabalho indicam que mesmo em situações em que os teores de potássio trocável e em solução são elevados, como no caso do solo Santo Ângelo, a difusão é o mecanismo dominante no suprimento de K às raízes do milho. Entretanto, nesta condição, o suprimento por fluxo de massa, nos períodos iniciais do crescimento, pode contribuir com até 30% do K total absorvido pelas plantas.

4.2.1.2. Suprimento de Ca

A contribuição dos mecanismos de suprimento de cálcio às raízes do milho, em três períodos de crescimento, nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo, é apresentada na Tabela 9, Nos dois solos a intercepção radicular mais o fluxo de massa supriram todo o cálcio absorvido pelas plantas. No solo Cruz Alta as raízes do milho interceptaram no primeiro período de crescimento (1 a 7 dias) cerca de 52% do Ca absorvido e nos demais em torno de 42% do nutriente. No solo

TABELA 9. Estimativa da absorção de Ca pelo milho e das quantidades supridas por intercepção radicular e fluxo de massa em três períodos de crescimento das plantas nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Idade das plantas[1]	Ca absorvido pelas plantas	Intercepção radicular	Fluxo de massa	
		Absorvido[2]	Absorvido	Acumulado
-- dias --	---------- mg/vaso ----------			
Cruz Alta				
1- 7	7,00	3,60 (51,5)[3]	3,40 (48,5)	21,7 (310,0)
8-13	20,9	8,70 (41,6)	12,2 (58,4)	47,1 (225,4)
14-17	22,5	9,50 (42,2)	13,0 (57,8)	33,5 (148,9)
Total	50,4	21,8 (43,3)	28,6 (56,7)	102,3 (203,0)
Santo Ângelo				
1- 7	6,26	6,26 (100)	0 (0)	69,2 (1.105)
8-13	21,7	20,5 (94,5)	1,2 (5,5)	174,8 (805,5)
14-17	28,2	2,25 (8,0)	26,0 (92,0)	213,6 (754,3)
Total	56,2	33,0 (58,7)	23,2 (41,3)	461,6 (821,6)

[1] Após transplante.
[2] Raiz e parte aérea.
[3] Percentagem relativa.

Santo Ângelo, com elevados teores de cálcio (Apêndice 16), nos primeiros 7 dias de crescimento as raízes interceptaram 10,3 mg de cálcio e no período de 8 a 13 dias de crescimento 22,9 mg de cálcio, quantidades que correspondem a 100% e 95% da que foi absorvida pelo milho, respectivamente, mostrando portanto que o mecanismo de intercepção radicular foi o principal responsável pelo suprimento de Ca às raízes,até os 13 dias de idade das plantas. No último período de crescimento, de 14 a 17 dias, como o incremento no volume de raízes foi muito pequeno no solo Santo Ângelo, de apenas 0,73 cm^3/vaso (Tabela 10), a intercepção radicular supriu somente 8,0% do Ca absorvido pelo milho, o que elevou a contribuição do fluxo de massa para 92,0%.

O fluxo de massa tanto no solo Cruz Alta como no Santo Ângelo supriu maiores quantidades de cálcio às plantas do que as absorvidas, o que possivelmente ocasionou acúmulo de cálcio na superfície das raízes. No solo Cruz Alta, em que os teores de cálcio eram baixos, o suprimento pelo fluxo de massa foi importante desde a primeira semana de crescimento das plantas, já que a intercepção radicular supriu cerca de metade do cálcio absorvido pelo milho. No solo Santo Ângelo este mecanismo seria importante a partir do 14º dia de crescimento das plantas, aceitando-se o proposto por OLIVER & BARBER (1966a), em que todos os íons interceptados pelas raízes são por elas absorvidos antes de quaisquer outros transportados por fluxo de massa ou difusão. Acúmulos de cálcio na superfície das raízes de soja foram referidos

TABELA 10. Estimativa da produção de matéria seca (raiz e parte aérea) e do volume de raízes em três períodos de crescimento do milho cultivado nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Idade das plantas[1]	Matéria seca				Volume de raízes	
	Raiz		Parte aérea		Incremento médio diário	Total no período
	Incremento médio diário	Total no período	Incremento médio diário	Total no período		
-- dias --	g/vaso				cm^3/vaso	
Cruz Alta						
1- 7	0,03	0,18	0,10	0,67	0,51	3,58
8-13	0,14	0,82	0,24	1,41	1,54	9,25
14-17	0,27	1,08	0,38	1,54	2,31	9,24
Total	-	2,08	-	3,62	-	21,1
DMS 5%	0,04	-	0,08	-	0,20	-
Santo Ângelo						
1- 7	0,03	0,18	0,11	0,77	0,47	3,30
8-13	0,07	0,44	0,44	2,62	1,11	6,65
14-17	0,02	0,07	1,02	4,07	0,18	0,73
Total	-	0,69	-	7,46	-	10,7
DMS 5%	NS	-	0,13	-	0,42	-

[1] Após transplante.

por AL-ABBAS & BARBER (1964) e por OLIVER & BARBER (1966a) e em milho por VARGAS et alii (1983), devido a grande quantidade do nutriente suprido por fluxo de massa. Estes autores também encontraram que a intercepção radicular e o fluxo de massa supriram todo o Ca requerido pelas plantas, sendo que em alguns casos o primeiro mecanismo supriu totalmente o elemento às raízes das plantas.

4.2.1.3. Suprimento de Mg

O fluxo de massa foi o principal mecanismo de suprimento do magnésio às raízes do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (Tabela 11), nos três períodos de crescimento das plantas. No solo Cruz Alta, com menores teores de Mg, este mecanismo supriu de 26% a 90% do magnésio absorvido pelas plantas. Nos dois primeiros períodos de crescimento do milho, neste solo, o fluxo supriu maiores quantidades de nutriente do que a absorvida pelas plantas, podendo ter ocorrido acúmulo do mesmo junto às raízes. No último período de crescimento do milho (14 a 17 dias de idade) os teores de Mg na solução estavam baixos (Apêndice 17), tendo ocorrido difusão do Mg às raízes.

No solo Santo Ângelo, com teores mais altos de Mg, nos três períodos de crescimento das plantas o fluxo de massa também supriu maiores quantidades do nutriente às raízes do que as absorvidas pelo milho; no último período de crescimento contribuiu com 98,6% do Mg absorvido pelas

TABELA 11. Estimativa da absorção de Mg pelo milho e das quantidades supridas por intercepção radicular, fluxo de massa e difusão, em três estágios de crescimento das plantas nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Idade das plantas[1]	Mg absorvido pelas plantas[2]	Intercepção radicular	Fluxo de massa		Difusão
			Absorvido	Acumulado	
-- dias --	---------- mg/vaso ----------				
Cruz Alta					
1- 7	5,12	0,74 (14,4)[3]	4,39 (85,6)	3,42 (66,8)	-
8-13	15,0	1,96 (13,1)	13,0 (86,9)	6,28 (41,9)	-
14-17	17,3	1,75 (10,1)	14,5 (89,9)	0 (0)	1,05 (6,07)
Total	37,4	4,45 (11,9)	33,0 (88,1)	8,55 (22,9)	-
Santo Ângelo					
1- 7	4,01	1,31 (32,7)	2,70 (67,3)	10,4 (259,4)	-
8-13	13,1	2,61 (19,9)	10,5 (80,1)	30,9 (235,9)	-
14-17	18,9	0,27 (1,43)	18,6 (98,6)	45,2 (239,4)	-
Total	36,0	4,19 (11,6)	31,8 (88,4)	86,5 (240,3)	-

1/ Após transplante.
2/ Raiz e parte aérea.
3/ Percentagem relativa.

plantas, devido ao pequeno incremento no volume de raízes (Tabela 10). VARGAS et alii (1983) também com solos do Rio Grande do Sul encontraram que o fluxo de massa foi o principal mecanismo de transporte do Mg à superfície das raízes de milho, tendo verificado, também, a ocorrência da difusão nos solos em que o teor de Mg foi baixo.

A intercepção radicular contribuiu com cerca de 12% do Mg absorvido pelas plantas no solo Cruz Alta; no primeiro período de crescimento do milho como a absorção foi baixa, sua contribuição relativa foi de 14,4% do total do nutriente absorvido pelas plantas.

No solo Santo Ângelo pelo mesmo motivo e ainda por ter teores mais elevados de Mg, a intercepção na primeira semana contribuiu, percentualmente, com quase um terço do Mg absorvido. No período de 14 a 17 dias de idade das plantas, como houve pouco aumento do volume radicular, sua contribuição foi pouco expressiva.

4.2.2. Morfologia do sistema radicular

As características morfológicas do sistema radicular em três períodos de crescimento do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo são apresentados na Tabela 12. Os resultados caracterizam a fase de crescimento exponencial das raízes no solo Cruz Alta até o 17º dia de idade das plantas, o que foi também observado em milho por MENGEL & BARBER (1974a), WARNCKE & BARBER (1974), EDWARDS & BARBER (1976a),

TABELA 12. Estimativa das características morfológicas e da taxa de crescimento de raízes de milho em três períodos de crescimento nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Idade das plantas[1]	Comprimento de raízes		Raio médio de raízes	Área superficial de raízes		Taxa de crescimento de raízes
	Incremento médio diário	Total no período		Incremento médio diário	Total no período	
-- dias --	-------- m/vaso --------		- $cm.10^{-2}$ -	------- cm^2/vaso ------		--- µm/s ---
Cruz Alta						
1- 7	9,39	65,7	1,37	79,1	554	10,1
8-13	26,7	160,4	1,33	226	1354	2,38
14-17	51,5	206,1	1,31	389	1556	1,89
Total	-	432,2	-	-	3464	-
DMS 5%	14,4	-	0,05	65,6	-	0,77
Santo Ângelo						
1- 7	4,84	33,9	1,61	54,2	379	8,95
8-13	15,8	94,9	1,66	145	872	2,58
14-17	13,2	52,8	1,45	76,5	306	1,00
Total	-	181,6	-	-	1557	-
DMS 5%	9,0	-	0,07	49,2	-	0,66

[1] Após transplante.

ANGHINONI & BARBER (1980a) e em soja por EDWARDS & BARBER (1976b), que também verificaram aumento exponencial no comprimento das raízes com a idade das plantas. No solo Santo Ângelo também ocorreu crescimento exponencial das raízes mas somente até o 13º dia de idade das plantas. Possivelmente no terceiro período de crescimento do milho, dos 14 aos 17 dias de idade, não houve estímulo para as plantas aumentarem o comprimento radicular exponencialmente devido as altas concentrações de nutrientes disponíveis no solo (Apêndices 15 a 17), considerando-se também que neste período não houve prejuízos na formação de matéria seca, que do 13º dia ao 17º dia de idade das plantas aumentou em 4,14 g/vaso (raiz e parte aérea), ou seja 1,03 vezes mais do que a produzida nos primeiros 13 dias de crescimento do milho (Tabela 10).

O comprimento de raízes no solo Cruz Alta foi 2,4 vezes superior ao encontrado no solo Santo Ângelo, o que ocorreu entre outros fatores à menor fertilidade daquele solo, o que deve ter provocado uma retroalimentação entre a parte aérea e as raízes no sentido de promover um aumento no comprimento radicular. Em trabalhos realizados com milho, ATKINSON (1973) e HALLMARK & BARBER (1981) também observaram redução no comprimento de raízes com o aumento dos teores de K no solo. Observa-se também no experimento I deste trabalho, Tabela 7, que com o aumento das doses que potássio aplicadas no solo Cruz Alta ocorreu diminuição no comprimento das raízes do milho.

O raio médio das raízes diminuiu com a idade do

milho em ambos os solos, sendo mais evidenciada no solo Santo Ângelo, em que o raio diminuiu de 1,61 para 1,45 cm x 10^{-2}, do primeiro para o último período de cultivo. BREWSTER & TINKER (1970) também verificaram este comportamento em raízes de alho, atribuindo à diminuição do raio das raízes ao fato de que com o aumento da idade das plantas há uma maior freqüência na emissão de raízes laterais (secundárias e terciárias), sendo estas mais finas que as anteriormente existentes. No solo Cruz Alta as raízes se apresentaram mais finas que no solo Santo Ângelo, possivelmente devido a menor fertilidade do primeiro, com as plantas emitindo maior número de raízes secundárias e terciárias visando uma melhor distribuição das mesmas no vaso para explorar um maior volume de solo.

A área superficial das raízes aumentou com a idade das plantas, sendo destacado o aumento que ocorreu nas fases iniciais de crescimento em que no segundo período de cultivo o incremento médio diário foi 2,86 e 2,68 vezes superior ao primeiro, nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo, respectivamente. Como no cálculo da área superficial de raízes se leva em conta o comprimento radicular e este foi estimulado no início do cultivo pelo corte das raízes, se explica os aumentos tão expressivos na área radicular entre estes dois períodos.

4.2.3. Absorção de K, Ca e Mg pelo milho

O influxo de K, Ca e Mg em três períodos de crescimento do milho são apresentados na Tabela 13. O maior influxo de nutrientes ocorreu no início do cultivo, nas plantas com 1 a 7 dias de idade, sendo que no solo Cruz Alta ele decresceu acentuadamente nos períodos subseqüentes. No solo Santo Ângelo após um decréscimo de 18,2 para 9,7 pmoles . $cm^{-2}.s^{-1}$ do primeiro para o segundo período de cultivo, permaneceu estável nas plantas com 14 a 17 dias de idade. O decréscimo do influxo com a idade das plantas também foi observado por MENGEL & BARBER (1974a), em experimento de campo com milho onde o Imax de K decresceu de 6,12 para 0,19 p moles.$cm^{-2}.s^{-1}$, com o aumento de idade das plantas de 20 para 60 dias. Em trabalho conduzido em casa de vegetação WARNCKE & BARBER (1974), cultivaram milho em solução nutritiva e verificaram decréscimo do Imax de K de 0,73 para 0,27 p moles . cm^{-2}. s^{-1}, para a idade das plantas de 18 e 53 dias, respectivamente.

A redução no influxo de K, Ca e Mg com o aumento da idade do milho cultivado no solo Cruz Alta deveu-se ao crescimento exponencial que as raízes apresentaram (Tabela 12), ficando a absorção distribuída para uma maior área superficial de raízes. A diminuição no influxo também ocorreu devido a depleção do solo (Apêndices 15 a 17), causados pela absorção das plantas, já que o solo Cruz Alta (textura média), tem baixo poder tampão, apresentando maior

TABELA 13. Estimativa das taxas de transpiração e absorção de água e do influxo de K, Ca e Mg em três períodos de crescimento do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Idade das plantas[1/]	Taxa de transpiração	Taxa de absorção de água	Influxo		
			K	Ca	Mg
------ dias -------	ml/g de tecido	$-cm^3.cm^{-2}.s^{-1}.10^6-$	-----	p Moles/cm^2.s	-----
Cruz Alta					
1- 7	129	1,26	11,3	1,89	2,26
8-13	132	0,52	3,68	0,92	1,09
14-17	127	0,37	1,85	0,63	0,79
DMS 5%	NS	0,22	1,17	0,18	0,27
Santo Ângelo					
1- 7	120	1,72	18,2	2,18	2,31
8-13	134	1,08	9,73	1,43	1,42
14-17	124	1,34	10,71	1,31	1,63
DMS 5%	NS	0,36	3,88	0,44	0,60

dificuldade para manter os íons em solução, sendo mais facilmente esgotados pelo cultivo.

No solo Santo Ângelo o influxo não variou significativamente entre os dois últimos períodos de crescimento do milho, devido ao pequeno incremento na área superficial de raízes (Tabela 12), enquanto que a absorção continuou a aumentar significativamente neste período (Tabelas 8, 9 e 11), causando em apenas quatro dias de cultivo um aumento de 203% no seu rendimento, em relação aquele dos treze primeiros dias de cultivo (Tabela 8). Os elevados teores de íons que este solo manteve até o final do cultivo (Apêndices 15 a 17), também favoreceram para que o influxo de nutrientes permanecesse elevado.

A redução na concentração de K, Ca e Mg, na parte aérea do milho (Tabela 14), com o aumento da idade de cultivo no solo Cruz Alta pode ter ocorrido em conseqüência da redução no influxo de íons e ao efeito "diluição" a exemplo do que foi encontrado por ANGHINONI et alii (1981), que atribuiu o decréscimo dos teores de nutrientes no tecido com a idade das plantas, à redução no Imax dos mesmos e ao maior desenvolvimento da parte aérea em relação ao crescimento de raízes de milho.

Comparando os dois solos estudados observa-se a maior capacidade de absorção de nutrientes pelo milho no solo Santo Ângelo em relação ao Cruz Alta o que ocorreu principalmente devido a maior fertilidade do primeiro. Nele as plantas desenvolveram um sistema radicular que foi inferior

TABELA 14. Teores de K, Ca e Mg no tecido (raiz e parte aérea), em três períodos de crescimento do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Idade das plantas[1/]	Concentração no tecido					
	K		Ca		Mg	
	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea
--- dias ---	---------- % ----------					
Cruz Alta						
7	2,12	5,34	0,65	0,87	0,54	0,62
13	1,91	4,95	0,68	1,02	0,56	0,70
17	1,72	4,19	0,63	1,03	0,48	0,76
DMS 5%	NS	0,62	NS	0,10	0,06	0,09
Santo Ângelo						
7	3,18	5,47	0,69	0,66	0,45	0,41
13	3,06	5,10	0,64	0,71	0,38	0,43
17	3,02	4,99	0,62	0,67	0,35	0,45
DMS 5%	NS	NS	NS	NS	0,06	NS

[1/] Após transplante.

à metade daquele formado no solo de textura média mas que foi suficiente para absorver quantidades de íons que superaram àquelas verificadas no solo Cruz Alta, proporcionando um maior rendimento das plantas. Estes resultados parecem indicar que em condições de alta fertilidade, como no caso do solo Santo Ângelo, mecanismos internos da planta atuam preferencialmente no sentido de diminuir a taxa de crescimento das raízes compensando a demanda do nutriente pela manutenção de um influxo elevado do mesmo. SILBERBUSH & BARBER (1983), conduzindo "análises de sensibilidade" para determinar o efeito relativo de parâmetros de solo e de planta, utilizados em modelos matemáticos, para predizer a absorção de K por plantas de soja, encontraram que o fator que mais influi na predição do K absorvido é a taxa de crescimento das raízes.

4.3. Experimento III - Compactação do solo

Neste experimento foram avaliados os efeitos de dois níveis de compactação nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo na morfologia das raízes, no suprimento e absorção de K, Ca e Mg por plantas de milho.

4.3.1. Mecanismos de suprimento de K, Ca e Mg às raízes do milho

4.3.1.1. Suprimento de K

As contribuições da intercepção radicular do fluxo de massa e da difusão no suprimento de K às raízes de milho cultivado nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo, em dois níveis de compactação são apresentados na Tabela 15. Em ambos os solos e nos dois níveis de compactação, a difusão foi o principal mecanismo responsável pelo suprimento de K às raízes de milho.

A compactação não afetou o suprimento de K por intercepção radicular no solo Cruz Alta, já as plantas cultivadas no solo Santo Ângelo com o adensamento interceptaram maior quantidade de íons. Devido aos teores mais elevados de K no solo Santo Ângelo, comparando aos do solo Cruz Alta (Apêndice 26), as quantidades do íon supridas por intercepção radicular foram superiores às obtidas no solo Cruz Alta, mesmo tendo o primeiro apresentado um menor volume de raízes (Tabela 16).

O suprimento de K por fluxo de massa não foi afetado pela compactação em ambos os solos. Observa-se entretanto, que no solo Santo Ângelo devido aos maiores teores de K em solução (Apêndice 26), que a quantidade do íon suprida às raízes por fluxo de massa foi em média 5,6 vezes superior àquela que ocorreu no solo de textura média.

TABELA 15. Efeito da compactação na absorção e no suprimento de K para o milho em 17 dias de cultivo nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Densidade	K absorvido pelas plantas[1/]	Intercepção radicular	Fluxo de massa	Difusão
------ g/cm^3 ------	---------- mg/vaso ----------			
Cruz Alta				
1,20	185,8	1,95 (1,05)[2/]	18,8 (10,1)	165,1 (88,8)
1,50	156,2	1,78 (1,14)	21,6 (13,9)	132,8 (85,0)
DMS 5%	20,1	NS	NS	23,0
CV %	5,41	12,1	8,24	6,81
Santo Ângelo				
0,85	393,1	4,06 (1,03)	109,4 (27,8)	279,2 (71,0)
1,17	270,7	6,81 (2,53)	114,9 (42,8)	149,0 (54,7)
DMS 5%	76,7	1,67	NS	77,5
CV %	10,2	13,6	8,47	15,9

[1/] Raiz e parte aérea

[2/] Os números entre parênteses indicam a contribuição percentual de cada mecanismo na quantidade de K absorvido.

TABELA 16. Efeito da compactação na produção de matéria seca, volume de raízes, taxa de absorção de água e taxa de transpiração do milho, cultivado por 17 dias nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidades	Produção de matéria seca			Volume de raízes	Taxa de absorção de água	Taxa de transpiração
	Raiz	Parta aérea	Total			
--- g/cm^3 ---	---------- g/vaso ---------			cm^3/vaso	$cm^3.cm^{-2}.s^{-1}.10^6$	ml/g de tecido
Cruz Alta						
1,20	2,08	3,62	5,70	22,1	0,80	129
1,50	1,46	3,76	5,22	15,6	1,16	157
DMS 5%	0,46	NS	NS	4,16	0,21	27
CV %	11,6	5,48	6,46	9,74	8,08	8,31
Santo Ângelo						
0,85	0,69	7,46	9,18	10,7	2,45	127
1,17	1,17	6,13	7,30	11,1	2,18	150
DMS 5%	0,28	0,89	1,35	NS	0,26	17
CV %	13,29	5,78	7,24	11,9	4,99	5,47

A compactação, tanto no solo Cruz Alta como no Santo Ângelo, diminuiu significativamente a quantidade de K que chegou até as raízes por difusão, sendo o seu efeito mais acentuado no solo argiloso. Esta possivelmente foi a causa da menor absorção de K pelas plantas, já que as quantidades supridas por intercepção radicular e por fluxo de massa praticamente não foram afetadas pela compactação.

Como a difusão foi o principal mecanismo de suprimento de K às raízes do milho e como pela metodologia usada a contribuição da difusão foi obtida pela diferença entre o K absorvido e a quantidade do íon suprida por intercepção radicular e fluxo de massa, não é possível precisar qual das características do solo provocou a diminuição no suprimento do K por difusão nos solos compactados.

O coeficiente de difusão é diretamente proporcional ao teor de água no solo, por esta reduzir a tortuosidade do caminho difusivo, aumentar a área de secção transversal disponível para a difusão (BARBER, 1974) e por diminuir o fator viscosidade, favorecendo a difusão (OLSEN & KEMPER, 1968). O teor de umidade foi maior nos tratamentos com compactação (Apêndice 4), o que poderia ter favorecido a difusão. Tanto no solo Cruz Alta como no Santo Ângelo os teores de K trocável e K solução em densidade normal e em condições de compactação são semelhantes, antes e após o cultivo, o que não influiu no gradiente de concentração (difusivo). A redução da difusão de K nos solos compactados também pode ser explicada pelo aumento do fator tortuosidade

provocado pela compactação, aumentando a distância pela qual o íon se difunde até às raízes. WARNCKE & BARBER (1971) observaram que a difusão de Zn em seis solos aumentou com o aumento da densidade até próxima de 1,5 g/cm^3, devido a diminuição do fator tortuosidade; acima deste valor, a difusão decresceu rapidamente por aumentar o caminho difusivo dos íons até às raízes.

Nos solos Santo Ângelo e Cruz Alta a compactação pode ter aproximado as partículas de solo, ocasionando obstrução dos poros, o que tornaria o caminho difusivo mais tortuoso, dificultando a difusão do K e diminuindo a sua quantidade suprida às raízes, acarretando uma redução na absorção total do K pelas plantas.

Estes resultados demonstram que a compactação do solo pode comprometer seriamente a absorção de íons cujo suprimento depende fundamentalmente da difusão, como é o caso do K, especialmente nos solos de textura argilosa como é o caso do Santo Ângelo.

4.3.1.2. Suprimento de Ca

O efeito da compactação dos solos Cruz Alta e Santo Ângelo sobre o suprimento de Ca às raízes de milho são apresentados na Tabela 17. Nos dois solos a intercepção radicular e o fluxo de massa supriram todo o Ca às raízes em quantidades superiores às absorvidas. A intercepção radicular supriu todo o Ca no solo Santo Ângelo compactado porque

embora o volume de raízes não tenha aumentado (Tabela 16), a intercepção de cálcio aumentou com a compactação e a sua absorção pelas plantas foi menor. A compactação não afetou o suprimento de Ca por intercepção radicular no solo Cruz Alta; embora o volume de raízes tenha diminuído; o suprimento foi possivelmente compensado pela menor absorção do nutriente pelas plantas.

O fluxo de massa supriu o restante do Ca que foi absorvido pelas plantas e não foi afetado pela compactação. Nos dois solos possivelmente ocorreu acúmulo do íon próximo às raízes devido às grandes quantidades supridas por fluxo de massa. No solo Santo Ângelo compactado a contribuição do fluxo de massa na quantidade de Ca absorvida pelo milho foi nula, já que a intercepção radicular supriu todo o cálculo requerido pelas plantas.

4.3.1.3. Suprimento de Mg

O suprimento de Mg por intercepção radicular e fluxo de massa e a sua absorção por milho cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo, são apresentados na Tabela 18. Não houve variação significativa no suprimento de Mg e na sua absorção pelas plantas para as duas densidades aplicadas ao solo Cruz Alta. No solo Santo Ângelo a compactação favoreceu o suprimento do nutriente por intercepção radicular que aumentou em 52% em relação ao tratamento de densidade normal, já que o volume de raízes não

TABELA 17. Efeito da compactação na absorção e no suprimento de Ca para o milho em 17 dias de cultivo nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Densidade	Ca absorvido pelas plantas[1]	Intercepção radicular	Fluxo de massa	
		Absorvido	Absorvido	Acumulado
-- g/cm^3 ---	---------- mg/vaso ----------			
Cruz Alta				
1,20	50,4	21,8 (43,3)[2]	28,6(56,7)	102,3
1,50	42,9	19,5 (45,2)	23,5(54,8)	133,9
DMS 5%	5,53	NS	4,5	16,5
CV %	5,22	11,6	7,66	6,15
Santo Ângelo				
0,85	56,2	33,1 (58,7)	23,2(41,3)	461,6
1,17	42,4	42,4(100)	0 (0)	405,1
DMS 5%	9,13	2,7	-	NS
CV %	8,31	3,18	-	7,55

[1] Raiz e parte aérea.

[2] Os números entre parênteses indicam a contribuição percentual de cada mecanismo na quantidade de Ca absorvido.

variou significativamente entre os tratamentos (Tabela 16).

O fluxo de massa contribuiu com a maior quantidade do Mg absorvido em ambos os solos, demonstrando que mesmo com a compactação, para as condições em que foi realizado este estudo, o fluxo de massa foi o principal responsável pelo suprimento de Mg às raízes das plantas. A exemplo do que ocorreu com o Ca, o suprimento de Mg por fluxo de massa não foi afetado pelo aumento da densidade dos solos.

Devido a menor produção de matéria seca do milho no solo Santo Ângelo compactado (Tabela 16), a exigência total de Mg foi menor, reduzindo a quantidade do nutriente absorvido.

4.3.2. Morfologia do sistema radicular

A morfologia das raízes do milho cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo, são apresentados na Tabela 19. A compactação limitou o crescimento das raízes do milho no solo Cruz Alta, onde em 17 dias de cultivo, o aumento da densidade para 1,50 g/cm^3 foi responsável por uma redução de 30% no comprimento de raízes e de 26% em sua área superficial, em relação às plantas que cresceram em solo com densidade normal. O desenvolvimento radicular não foi afetado significativamente pela compactação do solo Santo Ângelo.

A compactação do solo, até um certo limite, não é uma característica adversa ao desenvolvimento radicular.

TABELA 18. Efeito de compactação na absorção e no suprimento de Mg para o milho em 17 dias de cultivo nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Densidade	Mg absorvido pelas plantas[1]	Intercepção radicular	Fluxo de massa	
			Absorvido	Acumulado
------ g/cm^3 ------	---------- mg/vaso ----------			
Cruz Alta				
1,20	37,4	4,45 (11,9)[2]	33,0 (88,1)	8,6
1,50	34,6	4,03 (11,6)	30,6 (88,4)	13,6
DMS 5%	NS	NS	NS	NS
CV %	6,44	8,04	6,80	51,5
Santo Ângelo				
0,85	36,0	4,19 (11,6)	31,8 (88,4)	86,5
1,17	30,9	6,35 (20,5)	24,5 (79,5)	70,8
DMS 5%	NS	1,66	7,0	NS
CV %	9,63	13,9	10,9	13,4

[1] Raiz e parte aérea.

[2] Os números entre parênteses indicam a contribuição percentual de cada mecanismo na quantidade de Mg absorvido.

Possivelmente a compactação aplicada ao solo Santo Ângelo, de 1,17 g/cm^3, não afetou a pressão de turgor das células das raízes, tendo elas forças necessárias para empurrar a capa radicular e a região meristemática através do solo, sendo favorecidas pela maior umidade retida com a compactação (Apêndice 4), e pelas altas concentrações de K no solo (Apêndice 26). Resultados semelhantes foram obtidos por HALLMARK & BARBER (1981), que verificaram que a adição de K causou aumento na área superficial de raízes de soja cultivada em solo compactado, e que a aplicação de K auxiliou as raízes a vencer os danos causados pela compactação dos solos. GINGRICH & RUSSEL (1956), verificaram a relação entre o teor de umidade do solo e o desenvolvimento radicular, constatando que o crescimento de raízes de milho em pressão de sucção do solo de 12 bares, foi próxima a 25% daquela que se verificou em pressão de sucção de 1/3 bar, demonstrando que o teor mais elevado de umidade do solo, até um certo ponto, favorece o desenvolvimento radicular já que o excesso de água no solo cria condições de anaerobiose, que diminui o crescimento e as funções das raízes pela falta de oxigênio (GRABLE, 1966).

A diminuição no comprimento das raízes e a menor taxa de crescimento radicular no solo Cruz Alta compactados, possivelmente ocorreu devido ao aumento na resistência que foi oferecida à penetração de raízes. TAYLOR & GARDNER (1963), verificaram que com o aumento da resistência a penetração do solo, devido às altas densidades, que esta

TABELA 19. Efeito da compactação nas características morfológicas de raízes, taxa de crescimento radicular e influxo de K, Ca e Mg por milho cultivado por 17 dias nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Densidades	Comprimento de raízes	Raio de raízes	Área superficial de raízes	Taxa de crescimento de raízes	Influxo		
					K	Ca	Mg
-- g/cm^3 --	-- m/vaso --	$cm.10^{-2}$	- cm^2/vaso -	µm/s	--- p moles/$cm^2.s^{-1}$ ---		
Cruz Alta							
1,20	432,2	1,28	3460	5,42	5,19	1,37	1,67
1,50	304,1	1,28	2550	5,18	5,68	1,49	1,99
DMS 5%	38,5	NS	150	0,08	NS	NS	0,26
CV %	4,60	6,74	2,22	0,71	6,76	4,90	6,03
Santo Ângelo							
0,85	181,6	1,37	1560	4,83	21,08	2,76	3,10
1,17	200,3	1,33	1670	4,90	13,7	2,09	2,52
DMS 5%	NS	NS	NS	NS	3,82	0,51	0,66
CV %	8,30	7,00	7,61	1,17	9,66	9,34	10,31

reduziu não só a quantidade de raízes de algodão que penetraram no solo mas também a sua taxa de crescimento. CINTRA & MIELNICZUK (1983) verificaram que a compactação do solo aumentou a sua resistência à penetração de raízes de cinco culturas estudadas, limitando o desenvolvimento das mesmas, além de reduzir o espaço poroso do solo com conseqüente limitação na difusão do oxigênio. Desta forma a respiração foi dificultada pela falta de oxigênio, que não forneceu energia para a multiplicação celular, reduzindo a capacidade das raízes em absorver água e nutrientes do solo.

Nos dois solos o raio de raízes não foi afetado pelo aumento da densidade. Assim como ocorreu com o comprimento radicular do milho no solo Santo Ângelo, a compactação de 1,17 g/cm^3 foi baixa para alterar o raio de raízes das plantas. No solo Cruz Alta não se encontrou explicação para o idêntico raio de raízes nas duas densidades já que se esperava um engrossamento de raízes na maior densidade, devido ao aumento na resistência à penetração, que inclusive causou uma diminuição no comprimento radicular. PETERSON & BARBER (1981) verificaram que com o aumento da resistência que o meio oferece ao crescimento de raízes de soja, houve aumento no tamanho das células do córtex, tornando as raízes mais grossas.

4.3.3. Absorção de K, Ca e Mg pelo milho

O fluxo de entrada (influxo) de K, Ca e Mg para as

plantas de milho cultivadas em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo são apresentados na Tabela 19. No solo Cruz Alta, a compactação foi responsável por uma redução de 30 e 26% no comprimento e área superficial de raízes, respectivamente (Tabela 19), e como não houve variação no influxo, em relação ao tratamento não compactado, a absorção total de K e Ca diminuiu em 16 e 17%, respectivamente (Tabelas 15 e 17), não afetando, porém, o rendimento do milho que não foi significativamente diferente do obtido no tratamento sem compactação (Tabela 16). O aumento nas taxas de transpiração e de absorção de água com a compactação (Tabela 19), também favoreceram o aumento no fluxo de chegada de íons para as raízes. Já no solo Santo Ângelo, a compactação afetou de modo expressivo o suprimento de K, Ca e Mg para as raízes, principalmente do K que chegou às raízes preferencialmente por difusão, tendo o suprimento diminuido de 393 para 271 mg/vaso com o aumento da densidade de 0,85 para 1,17 g/cm^3 (Tabela 15). A redução no suprimento do K às raízes além de reduzir o seu influxo, limitou a produção de matéria seca, o que também resultou em menor influxo de Ca e Mg, já que a compactação não influiu no suprimento destes nutrientes, como visto antes.

Resultados semelhantes aos encontrados no solo Cruz Alta foram obtidos por SILBERBUSH et alii (1983) que verificaram em um solo franco siltoso que o aumento da densidade de 1,25 para 1,38 g/cm^3 aumentou o influxo de K por soja de 3,4 para 4,5 p moles.$cm^{-2}.s^{-1}$. Verificaram também que a

quantidade de K absorvida por vaso decresceu linearmente com o aumento da densidade do solo de 1,25 até 1,50 g/cm^3.

A redução na quantidade de K, Ca e Mg absorvidos pelas plantas com a compactação do solo Cruz Alta, fez decrescer os teores dos íons na parte aérea do milho (Tabela 20), já que o rendimento foi mantido (Tabela 16). No solo Santo Ângelo a concentração de K, Ca e Mg na parte aérea das plantas não variou significativamente porque apesar da absorção ter diminuído com a compactação do solo, o rendimento das plantas também diminuiu, mantendo a concentração dos íons no tecido (Tabela 20).

TABELA 20. Teores de K, Ca e Mg no tecido (raiz e parte aérea), do milho, com 17 dias de idade, cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Densidade	Concentração no tecido					
	K		Ca		Mg	
	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea
--- g/cm^3 ---	---------- % ----------					
Cruz Alta						
1,20	1,72	4,19	0,63	1,03	0,48	0,76
1,50	1,62	3,59	0,57	0,92	0,46	0,72
DMS 5%	NS	0,59	NS	0,09	NS	NS
CV %	9,57	6,65	8,18	3,94	5,42	6,17
Santa Ângelo						
0,85	3,02	4,99	0,62	0,67	0,35	0,45
1,17	2,28	4,01	0,31	0,64	0,26	0,46
DMS 5%	0,46	NS	0,04	NS	0,02	NS
CV %	7,56	9,79	3,40	8,01	2,69	6,45

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que, para os solos estudados:

a) Desde os períodos iniciais de crescimento do milho a difusão é o principal mecanismo de suprimento de K às raízes, mesmo quando o teor de K no solo é alto.

b) O fluxo de massa e a intercepção radicular suprem as exigências em cálcio e magnésio das plantas e estes mecanismos não são afetados pelo nível de K no solo.

c) Quando o teor de K no solo é alto as raízes apresentam menor comprimento e seu raio médio é maior.

d) Com o aumento do nível de K no solo aumenta o seu influxo pelas plantas, diminuindo o influxo de Ca e Mg. O influxo de K, Ca e Mg diminui com a idade das plantas.

e) O aumento da densidade dos solos diminuiu a absorção de K e Ca pelo milho; reduziu o rendimento e o influxo de nutrientes no solo de textura argilosa e o desenvolvimento radicular no solo de textura média, que entretanto, manteve a mesma taxa de influxo de nutrientes.

6. BIBLIOGRAFIA CITADA

ADAMS, F. 1974. Soil solution. In: CARSON, E.W., ed. *The plant root and its environment*. Charlottesville, University Press of Virginia. Cap. 19, p.441-485.

AL-ABBAS, H. & BARBER, S.A. 1964. Effect of root growth and massflow on the availability of soil calcium and magnesium to soybean in a greenhouse experiment. *Soil Science*, Baltimore, 97:103-107.

AMORIM, H.V. 1979. Respiração. In: FERRI, M.G. *Fisiologia vegetal*. São Paulo. Ed. da Universidade de São Paulo, v.1, p.248-277.

ANGHINONI, I. 1979. *A method for predicting the most efficient phosphate placement for corn using a simulation model*. Lafayette. 170f. Thesis (Ph.D.). Purdue University, West Lafayette, USA, 1979.

ANGHINONI, I.; BALIGAR, V.C.; BARBER, S.A. 1981. Growth and uptake rates of P, K, Ca and Mg in wheat. *Journal Plant Nutrition*, New York, 3(6):923-933.

ANGHINONI, I. & BARBER, S.A. 1980a. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. *Agronomy Journal*, Madison, 72:685-688.

_____. 1980b. Predicting the most efficient phosphorus placement for corn. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 44:1016-1020.

ARNDT, C.H. 1945. Temperature-growth relations of the roots and hypocotyls of cotton seedlings. *Plant Physiology*, Bethesda, 20:200-220.

ATKINSON, D. 1973. Some general effects of phosphorus deficiency on growth and development. *New Phytology*, Oxford, 72:101-111.

BALIGAR, V.C. & BARBER, S.A. 1978. Use of K/Rb ratio to characterize potassium uptake by plant roots growing in soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, *42*:575-579.

_____. 1979. Genotypic differences of corn for ion uptake. *Agronomy Journal*, Madison, *71*:870-873.

BALIGAR, V.C.; NASH, V.E.; HARE, M.L.; PRICE JR., J.A. 1975. Soybean root anatomy as influenced by soil bulk density. *Agronomy Journal*, Madison, *67*:842-844.

BARBER, S.A. 1962. A diffusion and massflow concept of soil nutrient availability. *Soil Science*, Baltimore, *93*: 39-49.

_____. 1966. The role of root interception, massflow and diffusion in regulating the uptake of ions by plants from soil. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. *Limiting steps in ion uptake by plants from soil*. Vienna. p.39-41. (Technical Reports Series, 65).

_____. 1968. Mechanism of potassium absorption by plants. In: KILMER, V.J.; YOUTS, E.S.; BRADY, N.C. Ed. *Potassium in Agriculture*. Madison. Soil Science Society of Agronomy, p.293-310.

_____. 1971. The influence of the plant root system in the evaluation of soil fertility. New Delhi. *Proceedings Symposium Soil Fertility Avaliation*, *1*:249-256.

_____. 1974. Influence of the plant root on ion moviment in soil. In: CARSON, E.W., ed. *The plant root and its environment*. Charlottesville, University Press of Virginia. Cap.18, p.525-564.

_____. 1980. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, F.E. & SAMPLE, E.C., ed. *The role of phosphorus in agriculture*. Madison, Soil Science Society of America. Cap.21, p.591-616.

_____. 1982. Mecanismos de absorção de potássio por plantas no solo. In: YAMADA, T.,ed. *Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba, p.213-226.

_____. 1984. *Soil nutrient bioavailability*. A mechanistic approach. New York, Wiley-Interscience. 398p.

BARBER, S.A. & CUSHMAN, J.H. 1981. Nitrogen uptake model for agronomic crops. In: ISKANDAR, I.K. ed. *Modeling wastewater renovation-land treatment*. New York, Wiley--Interscience. p.382-409.

BARBER, S.A. & OZANE, P.G. 1970. Autoradiopgraphic evidence for the differential effect of four plant species in altering the calcium content of the rhizosphere soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 34:635-637.

BARBER, S.A.; WALKER, J.M.; VASEY, E.H. 1962. Principles of ion movement through the soil the plant root. 3p. Trabalho apresentado na INTERNATIONAL SOIL CONFERENCE, New Zealand, 1962. *Proceedings...*

_____. 1963. Mechanisms for movement of plant nutrients from the soil and fertilizer to the plant root. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* Washington, D.C., 11:204-207.

BARLEY, K.P. 1970. The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. *Advances in Agronomy*, New York, 22:159-201.

BAR-YOSEF, B. 1971. Fluxes of P and Ca into intact corn roots and their dependence on solution concentration and root age. *Plant and Soil*, Amsterdan, 35:589-600.

BASSO, C. 1976. *Avaliação do estado nutricional da laranjeira-Valência (Citrus sinensis Osbeck), rendimento e qualidade dos frutos em um experimento de adubação em cinco pomares*. 101f. Dissertação (Mestr. Agron. - Solos). Fac. Agron. - UFRGS, Porto Alegre, 1976.

BECKETT, P.H.T. 1964. Studies on soil potassium. I. Configuration of the ratio law: Measurement of potassium potential. *Journal of Soil Science*, Oxford, 15(1):1-8.

BHAT, K.K.S. & NYE, P.H. 1974. Difusion of phosphate to plant post in soil. III. Depletion around anion roots without root hairs. *Plant and Soil*, Amsterdan, 38:383--394.

BOULDIN, J.R. 1961. Mathematical description of diffusion processes in the soil-plant system. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 25:476-480.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. 1973. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul*. Recife. 431p. (Boletim Técnico, 30).

BREWSTER, J.L.; BHAT, K.K.S.; NYE, P.H. 1975. The possibility of predicting solute uptake and plant growth response from independently measured soil and plant characteristics. III. The growth and uptake of anions in a soil fertilized to different initial levels of phosphate and comparison of the results with model predictions. *Plant and Soil*, Amsterdan, 42:197-226.

_____. 1976. The possibility of predicting solute uptake and plant growth response from independently measured soil and plant characteristics. IV. The growth and uptake of rape in solution of different phosphorus concentration. *Plant and Soil*, Amsterdan, 44:279-293.

BREWSTER, J.L. & TINKER, P.P. 1970. Nutrient cation flows in soil around plant roots. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 34:421-426.

CANAL, I.N. 1980. *Parâmetros da absorção de potássio e translocação de cálcio em milho (Zea mays L.), afetados pela interação alumínio-cálcio.* 85f. Dissertação (Mestr. Agron. - Solos). Fac. Agron. UFRGS. Porto Alegre, 1980.

CANAL, I.N. & MIELNICZUK, J. 1983. Parâmetros de absorção de potássio em milho (*Zea mays* L.), afetados pela interação alumínio-cálcio. *Ciência e Cultura*, São Paulo, 35(3): 336-340.

CHING, P.C. & BARBER, S.A. 1979. Evaluation of temperature effects on potassium uptake by corn. *Agronomy Journal*, Madison, 71:1040-1044.

CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUK, J. 1983. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 7:197-201.

CLAASSEN, N. & BARBER, S.A. 1974. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. *Plant Physiology*, Bethesda, 54:564-568.

_____. 1976. Simulation model for nutrient uptake from soil by a growing root system. *Agronomy Journal*, Madison, 68:961-964.

_____. 1977. Potassium influx characteristics of corn roots and interaction with N, P, Ca and Mg influx. *Agronomy Journal*, Madison, 69:860-864.

CLARK, R.B. 1977. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. *Plant and Soil*, Amsterdan, 47:653-662.

CLARKSON, D.T. & SANDERSON, J. 1971. *Relationship between anatomy of cereal roots and the absorption of nutrients and water*. Wantage, Agriculture Research Council, Letcombe Laboratory Report. 16p.

COREY, R.B. & SCHULTE, E.E. 1973. Factors affecting the availability of nutrients to plants. In: DINAUER, R.C., ed. *Soil testing and plant analysis*. Madison, Soil Science Society of America. Cap.3, p.23-33.

EDWARDS, J.H. & BARBER, S.A. 1976a. Nitrogen uptake characteristics of corn roots at low N concentration as influenced by plant age. *Agronomy Journal*, Madison, *68*:17-19.

_____. 1976b. Phosphorus uptake rate of soybean roots as influenced by plant age, root trimming, and solution P concentration. *Agronomy Journal*, Madison, *68*:973-975.

EPSTEIN, E. 1972. *Mineral nutrition of plants*: principles and perspectives. New York, J. Wiley. 412p.

FERGUSON, I.B. & CLARKSON, D.T. 1975. Ion transport and endodermal suberization in the roots of *Zea mays*. *New Phitology*, Oxford, *75*:69-79.

FLEMING, A.L. & FOY, C.D. 1968. Root structure differential aluminum tolerance in wheat varieties. *Agronomy Journal*, Madison, *60*:172-176.

FORSYTHE, W.M. 1975. *Física de suelos*; manual de laboratório. San Jose, IICA. 212p. (Lybros y Materiales Educativos, 25).

FOY, C.D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E.W., ed. *The plant root and its environment*. Charlottesville, University Press of Virginia. p.601-642.

FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; ARMIGER, W.H. 1969. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. *Agronomy Journal*, Madison, *61*:505-511.

GIANELLO, C. 1978. *Estudo de algumas características físicas e químicas que influem na absorção de K pelas plantas*. 95f. Dissertação (Mestr. Agron. - Solos) Fac. Agron., UFRGS. Porto Alegre, 1978.

GINGRICH, J.R. & RUSSELL, M.B. 1956. Effect of soil moisture tension and oxygen concentration on the growth of corn roots. *Agronomy Journal*, Madison, *48*:517-520.

GRABLE, A.R. 1966. Soil aeration and plant growth *Advances in Agronomy*, New York, *18*:57-106.

HALLMARK, W.B. & BARBER, S.A. 1981. Root growth and morphology, nutrient uptake, and nutrient status of soybeans as affected by soil K and bulk density. *Agronomy Journal*, Madison, 73:779-782.

HALSTEAD, E.H.; BARBER, S.A.; WARNCKE, D.D.; BOLE, J.B. 1968. Supply of Ca, Sr, Mn and Zn to plant roots growing in soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 32:69-72.

HELYAR, K.R. & MUNNS, K.N. 1975. Phosphate fluxes in the soil-plant system: a computer simulation. *Hilgardia*, Berkeley, 43:103-130.

HODGES, T.K. 1973. Ion absorption by plant roots. *Advances in Agronomy*, New York, 25:163-207.

HOFFMANN, W.F. & BARBER, S.A. 1971. Phosphorus uptake by wheat (*Triticum aestivum*) as influenced by ion accumulation in the rhizocylinder. *Soil Science*, Baltimore, 112:256-62.

ISAAC, R.A. & KERBER, J.D. 1971. Atomic absorption and flame photometry, tecniques and uses in soil, plant and water analysis. In: WALSH, L.M., ed. *Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue*. Madison, Soil Science Society of America. p.17-37.

ITOH, S. & BARBER, S.A. 1983. Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. *Agronomy Journal* Madison, 75:457-461.

KHASAWNEH, F.E. & COPELAND, J.P. 1973. Cotton root growth and uptake of nutrients: relations of phosphorus uptake to quantity, intensity and buffering capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 37:250-254.

MALAVOLTA, E. 1980. *Elementos de nutrição mineral das plantas*. São Paulo, Ceres. 254p.

MAURYA, P.R. & LAL, R. 1979. Effects of bulk density and soil moisture on radicle elongation of some tropical crops. In: LEAL, R. & GREENLAND, D.J., ed. *Soil physical properties and crop production in the tropics*. New York, Wiley - Interscience. p.339-347.

MENGEL, D.B. & BARBER, S.A. 1974a. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. *Agronomy Journal*, Madison, 66:399-402.

MENGEL, D.B. & BARBER, S.A. 1974b. Development and distribution of the corn root system under field conditions. *Agronomy Journal*, Madison, *66*:341-344.

MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; **BOHNEN, A. 1969.** *Recomendação de adubo e calcário para os solos do Rio Grande do Sul.* Porto Alegre, Faculdade de Agronomia, **UFRGS. 38p.** (Boletim Técnico, 2).

NIELSEN, N.E. & BARBER, S.A. 1978. Differences among genotypes of corn in the kinetics of phosphorus uptake. *Agronomy Journal*, Madison, *70*:695-698.

NYE, P.H. & TINKER, P.B. 1977. *Solute movement in the soil-root system.* Oxford, Blackwell. Cap. 6, p.127-186.

OLIVER, S. & BARBER, S.A. 1966a. An evaluation of the mechanisms governing the supply of Ca, Mg, K, and Na to soybean roots (*Glycine max*). *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, *30*:82-86.

_____. 1966b. Mechanisms of the movement of Mn, Fe, B, Cu, Zn, Al e Sr. from one soil to the surface of soybean roots (*Glycine max*). *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, *30*:468-470.

OLSEN, S.R. & KEMPER, W.D. 1968. Movment of nutrients to plant roots. In: NORMAN, A.G., ed. *Advances in Agronomy*, New York, Academic Press. v.20, p.91-151.

PARISH, D.H. 1971. Soil conditions as they affect plant establishment, root development, and yield. E - Effects of compaction on nutrient supply to plants. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDERBERG, G.E. ed., *Compaction of agricultural soils.* St. Joseph. American Society Agricultural Engineers. p.277-291.

PASSIOURA, J.B. 1966. The amounts of nutrients contacted by roots. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. *Limiting steps in ion uptake by plants from soil.* p.82-84. (Technical Reports Series, 65).

PETERSON, W.R. & BARBER, S.A. 1981. Soybean root morphology and K uptake. *Agronomy Journal*, Madison, *73*:316-319.

POWELL, C.L. 1974. Effect of P fertilizer on root morphology and P uptake by *Carex coriacea*. *Plant and Soil*, Amsterdan, *41*:661-667.

RAPER, C.D. & BARBER, S.A. 1970a. Rooting systems of soybeans. I. Differences in root morphology among varieties. *Agronomy Journal*, Madison, *62*:581-584.

RILEY, D. & BARBER, S.A. 1971. Effect of ammonium and nitrate fertilization on phosphorus uptake as related to root-induced pH changes et the root-soil interface. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 35:301-306.

ROVIRA, A.D. & BOWEN, G.D. 1970. Translocation and loss of phosphate along roots of wheat seedlings. *Planta*, New York, *93*:15-25.

SCHENK, M.K. & BARBER, S.A. 1979. Root characteristic of corn genotypes as related to phosphorus uptake. *Agronomy Journal*, Madison, *71*:921-924.

_____. 1980. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. *Plant and Soil*, Amsterdan, *54*:65-76.

SILBERBUSH, M. & BARBER, S.A. 1983. Sensitivity analysis of parameters used in simulating potassium uptake with a mechanistic mathematical model. *Agronomy Journal*, Madison, *75*:851-854.

SILBERBUSH, M.; HALMARK, W.B.; BARBER, S.A. 1983. Simulation of effects of soil bulk density and P addition on K uptake by soybeans. *Communications Soil Science Plant Analysis*, New York, *14*:287-296.

SILVA FILHO, G.N. 1983. *Aumento percentual do mecanismo de difusão no suprimento de potássio com a idade do milho*. Porto Alegre, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia. 15f.

SILVA FILHO, G.N.; SENA, J.O.A.; RODRIGUES, A.B.A.; COSTA, N.L. 1982. Contribuição dos diferentes mecanismos de suprimento de K às raízes de *Zea mays* L., *Penissetum americanum*, *Brassica campestris* L., *Glycine max* L. Merrill, *Dolichos lab-lab*, no solo pituva. Porto Alegre, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia. 17f.

SMILEY, R.M. 1974. Rhizosfere pH as influenced by plants, soils and nitrogen fertilizers. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, *38*:795-799.

TAYLOR, H.M. 1967. Effects of tillage - induced soil environment changes on root growth. In: PROCEEDING OF TILLAGE FOR GREATER CROP PRODUCTION CONFERENCE. St. JOSEPH. American Society Agricultural Engineers, p.15-18.

TAYLOR, H.M. 1971. Soil conditions as they affect plant establishment, root development, and yield. F - Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VAN DER BERGER, G.E. ed. *Compaction of agricultural soils*. St. Joseph. American Society Agricultural Engineers. p.292-305.

TAYLOR, H.M. & GARDNER, H.R. 1963. Penetration of cotton seedling toproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Science*, Baltimore, *96*:153-156.

TAYLOR, H.M.; HUCK, M.G.; KLEPPER, B. 1972. Root development in relation to soil physical conditions. In: HILLEL, D. ed., *Optimizing the soil physical environment toward greate or crop yields*. New York. Academic Press. p.57-77.

TAYLOR, S.A. 1972. *Physical edaphology*; the physics of irrigated and nonirrigated soils. São Francisco. W.H. Freedman. p.352-393.

TENNANT, D. 1975. A test of a modified line intercept method of estimating root length. *Journal of Ecology*, London, *63*:995-1001.

VARGAS, R.M.B.; MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. 1983. Mecanismos de suprimento de K, Ca, Mg e P às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 7:143-148

VASEY, E.H. & BARBER, S.A. 1963. Effect of placement on absorption of ^{86}Rb and ^{32}p from soil by corn roots. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, *27*:193-97.

VIEGAND, C.L. & LEMON, E.R. 1958. A field study of some plant relations in aeration. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, *22*:216-221.

VIEIRA, M.J. 1978. *Perdas por erosão sob diferentes sistemas de preparo do solo para a cultura da soja (Glycine max (L.) Merr.), em condições de chuva simulada*. 108f. Dissertação (Mestr. Agron. - Solos). Fac. Agron., UFRGS. Porto Alegre, 1978.

VILELA, L. & ANGHINONI, I. 1984. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio - fósforo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, *8*:91-96.

VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. 1961. Soil compaction - its effects on storage and movement of soil, air and water. *Transactions of the America Society Agricultural Engineers*, St. Joseph, *4*:242-246.

WALKER, J.M. 1969. One degree increments in soil temperatures affect maize seedling behavior. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, *33*(5):729-736.

WALKER, J.M. & BARBER, S.A. 1962. Uptake of rubidium and potassium from soil by corn roots. *Plant and Soil*, Amsterdan, *17*:243-59.

WALLACE, A.; TOTH, S.J.; BEAR, F.E. 1948. Further evidence supporting cation equivalent constancy in alfalfa. *Agronomy Journal*, Madison, *40*:80-87.

WARNCKE, D.D. & BARBER, S.A. 1971. Diffusion of Zn in soils. II. The influence of soil bulk density and its interaction with soil moisture. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, *36*:42-46.

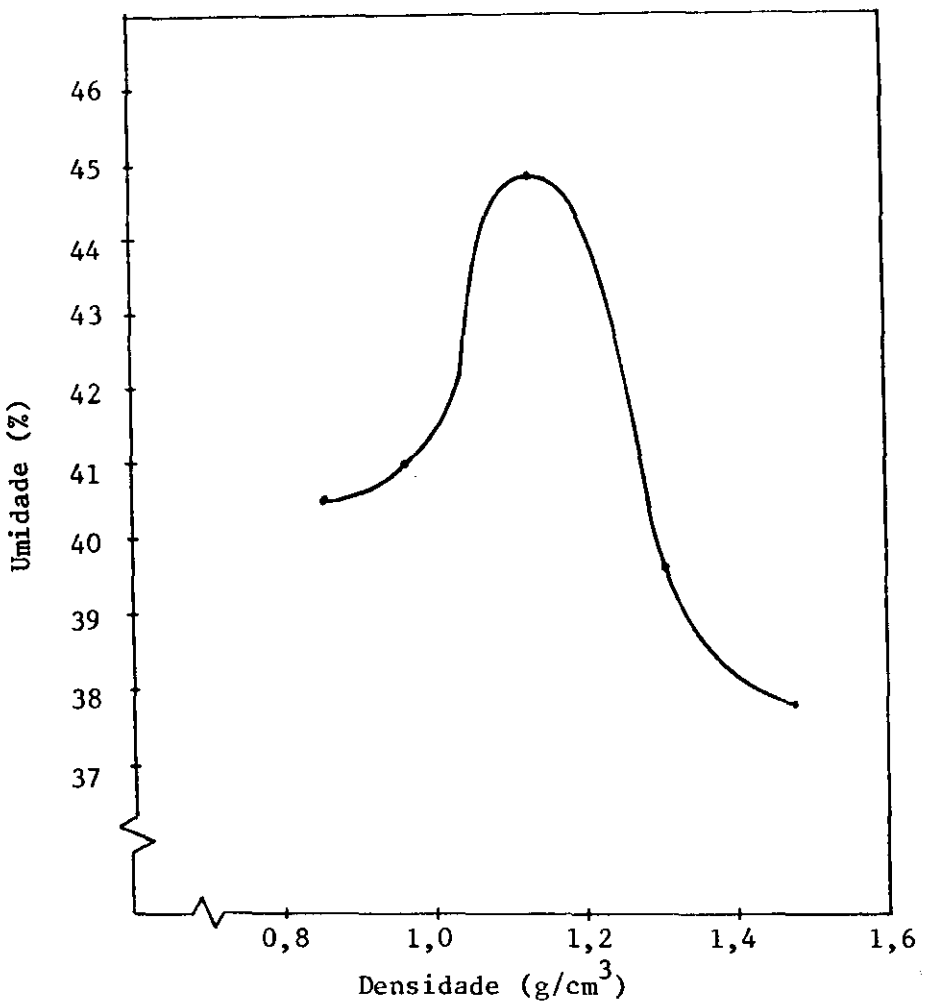
_____. 1974. Nitrate uptake effectiveness of four plant species. *Journal of Environmental Quality*, Madison, *3*(1):28-30.

WIETHOLTER, S. 1983. *Predicting potassium uptake by corn in the field using the strontium nitrate soil testing method and a difusion - controlled uptake model.* 244p. Thesis (Ph.D. - Soils). Soils Department, University of Wisconsin, Madison, USA, 1983.

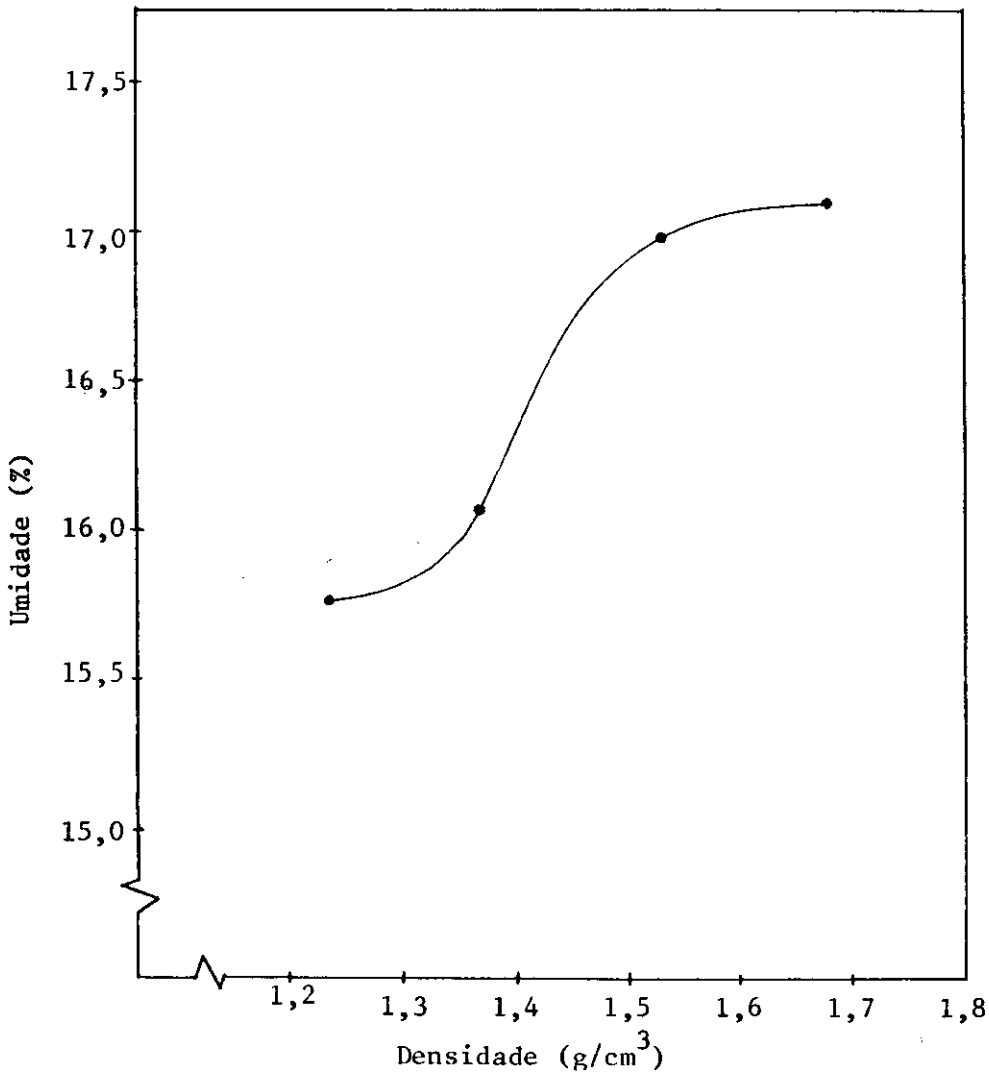
WILKINSON, H.F.; LONERAGAN, J.F.; WUIRK, J.P. 1968. The movement of zinc to plant roots. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, *32*:831-33.

WILLIAMS, R.F. 1948. The effects of phosphorus supply on the rates of intake of phosphorus and nitrogen upon certain aspects of phosphorus metabolism in gramineous plants. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, *1*:333-361.

7. APÊNDICES



APÊNDICE 1. Relação entre a densidade e a capacidade de retenção de umidade do solo Santo Ângelo.



APÊNDICE 2. Relação entre a densidade e a capacidade de retenção de umidade do solo Cruz Alta.

APÊNDICE 3. Volume e porosidade dos solos Santo Ângelo e Cruz Alta nas densidades a que os mesmos foram submetidos.

Solo	Densidade	Volume	Porosidade
	- g/cm^3 -	-- l --	---- % ----
Santo Ângelo			
Não compactado	0,85	2,40	67,9
Compactado	1,17	1,74	54,3
Cruz Alta			
Não compactado	1,20	2,40	55,3
Compactado	1,50	1,92	44,5

APÊNDICE 4. Capacidade de campo* e umidade gravimétrica a 0,3 bares dos solos Santo Ângelo e Cruz Alta.

Solo	Umidade gravimétrica (0,3 bar)	Capacidade de campo
	---------- % ----------	
Santo Ângelo		
Não compactado	36,5	40,5
Compactado	-	43,2
Cruz Alta		
Não compactado	15,4	15,8
Compactado	-	17,0

*Obtida em colunas de vidro após equilíbrio por 24 horas.

APÊNDICE 5. Produção de matéria seca (raiz e parte aérea), volume de raízes e características químicas e morfológicas de plântulas de milho na ocasião do transplante (médias de três repetições).

Determinações	Raiz	Parte aérea
Matéria seca (g)	0,08	0,17
Volume (cm^3)	0,95	-
Comprimento (cm)	15	-
Raio (cm x 10^{-2})	1,42	-
Área superficial (cm^2)	13,4	-
Teor de K (%)	0,66	0,17
Teor de Ca (%)	0,25	0,27
Teor de Mg (%)	0,16	0,16

APÊNDICE 6. Teores de K trocável e K na solução, determinados antes e após o cultivo do milho no solo Cruz Alta com quatro níveis de K adicionados.

K adicionado	K trocável[1]		K solução[2]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- µg/g ---	---------- µg/g solo ----------				----- µg/ml -------	
0	48,4	14,0	2,01	0,98	12,7	6,2
50	104,8	21,5	4,65	2,34	29,4	14,7
100	133,1	31,7	8,60	2,69	54,3	17,0
150	217,8	50,4	15,2	4,46	96,1	28,2

[1] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).

[2] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 7. Teores de Ca trocável e Ca na solução, determinados antes e após o cultivo do milho no solo Cruz Alta com quatro níveis de K adicionados.

K adicionado	Ca trocável[1]		Ca solução[2]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- µg/g ---	---------- µg/g solo ----------				----- µg/ml -------	
0	758	432	65,1	59,3	411	374
50	868	427	63,5	59,7	401	377
100	814	425	70,9	61,9	448	391
150	839	429	87,2	54,0	528	341

[1] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).

[2] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 8. Teores de Mg trocável e Mg na solução, determinados antes e após o cultivo de milho no solo Cruz Alta com quatro níveis de K adicionados.

K adicionado	Mg trocável[1]		Mg solução[2]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- µg/g ---	---------- µg/g solo ----------				------ µg/ml ------	
0	154,6	73,6	9,21	6,98	58,1	44,1
50	153,8	78,2	8,31	7,02	52,5	44,4
100	133,8	69,0	9,51	7,81	62,0	49,3
150	140,8	71,3	11,2	6,52	70,3	41,2

[1] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).

[2] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 9. Produção de matéria seca (raiz e parte aérea), do milho após 15 dias de cultivo em solo Cruz Alta em quatro doses de K.

K adicionado	Matéria seca					
	I	II	III	I	II	III
--- µg/g ---	---------- g/vaso ----------					
0	1,20	1,11	1,05	2,94	2,82	2,53
50	1,31	1,34	1,37	2,99	3,08	3,20
100	1,18	1,68	1,36	2,98	3,67	3,40
150	1,21	1,35	1,19	3,14	3,14	2,89

APÊNDICE 10. Comprimento e volume de raízes de milho, após 15 dias de crescimento, no solo Cruz Alta com quatro níveis de K adicionados.

K adicionado	Comprimento de raízes			Volume de raízes		
	I	II	III	I	II	III
--- µg/g ---	----	m/vaso	----	---	cm^3/vaso	---
0	284	275	286	16,7	14,6	15,7
50	294	247	288	18,8	16,3	19,1
100	243	269	284	14,8	19,6	18,2
150	220	241	218	16,5	14,8	16,9

APÊNDICE 11. Taxa de transpiração e quantiade total de água transpirada pelo milho, durante 15 dias de cultivo no solo Cruz Alta com quatro doses de K.

K adicionado	Taxa de transpiração			Água transpirada		
	I	II	III	I	II	III
--- µg/g ---	- ml/g de tecido -			---- ml/vaso ----		
0	142	142	143	587	558	513
50	137	131	133	588	581	608
100	127	118	135	527	629	644
150	123	111	120	537	500	491

APÊNDICE 12. Teor de K no tecido (raiz e parte aérea) do milho cultivado por 15 dias no solo Cruz Alta com quatro doses de K.

K adicionado	K no tecido					
	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
--- µg/g ---	---------- % ----------					
0	1,00	1,02	1,17	1,55	1,59	1,67
50	2,61	2,27	2,66	3,88	3,48	3,89
100	2,96	2,78	2,70	3,99	4,07	4,16
150	3,18	3,90	3,52	4,48	4,48	4,37

APÊNDICE 13. Teor de Ca no tecido (raiz e parte aérea), do milho cultivado por 15 dias no solo Cruz Alta com quatro doses de K.

K adicionado	Ca no tecido					
	Raíz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
--- µg/g ---	---------- % ----------					
0	0,79	0,81	0,99	2,40	2,40	2,33
50	0,82	0,83	0,83	1,92	1,64	1,75
100	0,66	0,61	0,64	1,64	1,55	1,50
150	0,58	0,59	0,60	1,34	1,30	1,33

APÊNDICE 14. Teor de Mg no tecido (raíz e parte aérea), do milho cultivado por 15 dias no solo Cruz Alta com quatro doses de K.

K adicionado	Mg no tecido					
	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
--- µg/g ---	---------- % ----------					
0	0,44	0,46	0,52	1,10	1,12	1,07
50	0,50	0,48	0,44	0,61	0,62	0,60
100	0,33	0,32	0,27	0,58	0,43	0,47
150	0,28	0,26	0,26	0,38	0,38	0,42

APÊNDICE 15. Teores de K trocável e K na solução, determinados antes e após o cultivo do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Período de crescimento[1]	K trocável[2]		K solução[3]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- dias ---	----------µg/g solo----------				----- µg/ml -------	
Cruz Alta						
1- 7	106,7	82,1	7,00	4,86	44,2	30,7
1-13	109,8	53,5	7,26	2,71	45,8	17,1
1-17	110,9	28,2	6,80	1,33	42,9	8,37
Santo Ângelo						
1- 7	563,7	507,1	58,8	44,4	145,1	109,6
1-13	583,6	404,0	62,2	31,8	153,7	78,5
1-17	575,3	257,6	60,6	15,5	149,5	38,3

[1] Após transplante.

[2] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).

[3] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 16. Teores de Ca trocável e Ca na solução, determinados antes e após o cultivo do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Períodos de crescimento[1]	Ca trocável[2]		Ca solução[3]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- dias ---	---------- µg/g solo ----------				------ µg/ml -------	
Cruz Alta						
1- 7	816,3	788,0	38,7	32,9	244,4	208,3
1-13	837,5	696,1	36,1	30,0	228,1	189,4
1-17	858,7	727,9	33,5	23,4	211,7	147,9
Santo Ângelo						
1- 7	3590	3329	212,3	189,5	524,2	467,9
1-13	3695	3541	197,5	150,7	487,6	372,1
1-17	3593	3424	204,1	132,9	504,0	328,0

[1] Após transplante.
[2] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).
[3] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 17. Teores de Mg trocável e Mg na solução, determinados antes e após o cultivo do milho nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Períodos de Crescimento[1]	Mg trocável[2]		Mg solução[3]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- dias ----	---------- µg/g solo ----------				------µg/ml -------	
Cruz Alta						
1- 7	170,4	150,7	12,2	10,1	76,9	63,8
1-13	182,7	147,9	11,8	9,65	74,3	60,9
1-17	167,4	151,0	12,5	5,12	79,0	32,3
Santo Ângelo						
1- 7	433,2	407,5	51,5	42,0	127,3	103,7
1-13	450,3	428,4	52,1	32,7	128,5	80,6
1-17	448,9	411,6	53,6	28,4	132,3	70,1

[1] Após transplante.
[2] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).
[3] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 18. Produção de matéria seca (raiz e parte aérea), em três período de cultivo do milho, nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Períodos de crescimento[1/]	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
---- dias ----	---------- g/vaso ----------					
Cruz Alta						
1- 7	0,21	0,18	0,16	0,65	0,68	0,68
1-13	0,88	1,10	1,02	1,92	2,10	2,23
1-17	2,12	2,20	1,93	3,40	3,91	3,55
Santo Ângelo						
1- 7	0,15	0,16	0,22	0,73	0,76	0,82
1-13	0,55	0,70	0,61	2,96	3,56	3,65
1-17	0,62	0,78	0,68	7,28	7,91	7,20

[1/] Após transplante.

APÊNDICE 19. Comprimento e volume de raízes de milho em três períodos de crescimento nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Períodos de crescimento[1/]	Comprimento de raízes			Volume de raízes		
	I	II	III	I	II	III
---- dias ----	----	m/vaso	----	---	cm^3/vaso	---
Cruz Alta						
1- 7	73,6	60,6	63,0	3,60	3,62	3,52
1-13	200	258	220	12,3	13,9	12,3
1-17	446	419	432	21,6	23,5	21,2
Santo Ângelo						
1- 7	36,8	29,4	35,4	3,41	3,15	3,35
1-13	114	143	130	8,35	10,4	9,87
1-17	225	192	171	10,7	10,1	11,2

[1/] Após transplante.

APÊNDICE 20. Raio médio de raízes de milho em três períodos de crescimento nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Períodos de crescimento[1/]	Raio médio de raízes			Raio de raízes[2/]		
	I	II	III	I	II	III
---- dias ----	---------- cm.10^{-2} ----------					
Cruz Alta						
1- 7	1,34	1,40	1,38	1,25	1,38	1,33
1-13	1,41	1,37	1,38	1,40	1,31	1,33
1-17	1,33	1,38	1,34	1,24	1,34	1,25
Santo Ângelo						
1- 7	1,60	1,64	1,58	1,77	1,85	1,74
1-13	1,48	1,48	1,49	1,53	1,53	1,55
1-17	1,40	1,36	1,43	1,37	1,29	1,44

[1/] Após transplante.

[2/] Determinado no fim do período de crescimento das plantas.

APÊNDICE 21. Taxa de transpiração e quantidade total de água transpirada pelo milho em três períodos de crescimento nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Períodos de crescimento[1/]	Taxa de transpiração			Água transpirada		
	I	II	III	I	II	III
---- dias ----	- ml/g de tecido -			---- ml/vaso ----		
Cruz Alta						
0- 7	123	135	129	107	116	109
8-13	141	119	137	273	278	329
14-17	91	137	154	248	397	344
Santo Ângelo						
0- 7	129	117	114	114	108	118
8-13	123	137	139	325	456	448
14-17	134	121	118	719	685	529

[1/] Após transplante.

APÊNDICE 22. Influxo de K, Ca, e Mg por milho em três períodos de crescimento nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo (médias de três repetições).

Períodos de crescimento[1/]	Influxo		
	K	Ca	Mg
---------- dias ----------	------- pMoles/cm^2.s^{-1} -------		
Cruz Alta			
1- 7	11,3	1,89	2,26
1-13	7,17	1,60	1,90
1-17	5,19	1,37	1,67
DMS 5%	1,05	0,22	0,22
Santo Ângelo			
1- 7	18,2	2,18	2,31
1-13	16,0	2,24	2,25
1-17	21,08	2,76	3,10
DMS 5%	3,74	0,41	0,54

[1/] Após transplante.

APÊNDICE 23. Teor de K no tecido (raiz e parte aérea), do milho com três idades, cultivado nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Idade da planta [1]	K no tecido					
	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
--- dias ---	---------- % ----------					
Cruz Alta						
7	2,20	2,05	2,10	5,34	5,40	5,28
13	2,20	1,73	1,81	4,89	5,38	4,58
17	1,79	1,71	1,66	4,58	3,96	4,04
Santo Ângelo						
7	2,95	3,18	3,40	5,39	5,42	5,60
13	3,02	3,11	3,06	5,32	4,89	5,08
17	2,90	3,19	2,98	5,11	5,18	4,68

[1] Após transplante.

APÊNDICE 24. Teor de Ca no tecido (raiz e parte aérea), do milho com três idades, cultivado nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Idade das plantas[1/]	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
---- dias ----	---------- % ----------					
Cruz Alta						
7	0,65	0,70	0,60	0,88	0,88	0,85
13	0,71	0,73	0,60	1,11	0,98	0,97
17	0,66	0,66	0,56	1,07	1,00	1,03
Santo Ângelo						
7	0,72	0,76	0,58	0,68	0,66	0,64
13	0,63	0,68	0,61	0,72	0,68	0,72
17	0,62	0,61	0,63	0,71	0,69	0,61

[1/] Após transplante.

APÊNDICE 25. Teor de Mg no tecido (raiz e parte aérea), do milho com três idades cultivado nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Idade da planta[1/]	Mg no tecido					
	I	II	III	I	II	III
---- dias ----	---------- % ----------					
Cruz Alta						
7	0,53	0,57	0,52	0,62	0,60	0,63
13	0,55	0,60	0,54	0,73	0,72	0,65
17	0,52	0,47	0,46	0,83	0,73	0,71
Santo Ângelo						
7	0,42	0,51	0,43	0,41	0,42	0,41
13	0,38	0,37	0,40	0,43	0,45	0,42
17	0,34	0,36	0,35	0,49	0,46	0,41

[1/] Após transplante.

APÊNDICE 26. Teores de K trocável e K na solução, determinados antes e após o cultivo do milho em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	K trocável[1]		K solução[2]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- g/cm^3 ---	----------µg/g solo----------				-------µg/ml ------	
Cruz Alta						
1,20	110,9	28,2	6,80	1,33	42,9	8,37
1,50	108,7	35,5	7,69	1,23	43,5	7,24
Santo Ângelo						
0,85	575,3	257,6	60,6	15,5	149,5	38,3
1,17	571,0	392,3	69,6	20,8	161,1	48,2

[1] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).
[2] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 27. Teores de Ca trocável e na solução, determinados antes e após o cultivo do milho em duas densidade nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	Ca trocável[1]		Ca solução[2]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- g/cm^3 ---	---------- µg/g solo ----------				------ µg/ml ------	
Cruz Alta						
1,20	858,7	728,0	33,5	23,4	211,7	147,9
1,50	821,2	773,9	39,7	25,4	233,6	149,5
Santo Ângelo						
0,85	3593	3424	204,1	132,9	504,0	328,0
1,17	3698	3604	220,7	97,8	510,8	226,4

[1] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).

[2] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 28. Teores de Mg trocável e Mg na solução, determinados antes e após o cultivo do milho em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	Mg trocável[1]		Mg solução[2]			
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
--- g/cm^3 ---	---------- µg/g solo ----------				------ µg/ml ------	
Cruz Alta						
1,20	167,4	151,0	12,5	5,12	79,0	32,3
1,50	176,2	151,2	12,8	5,42	75,5	31,9
Santo Ângelo						
0,85	449,0	411,6	53,6	28,4	132,3	70,1
1,17	465,7	436,8	56,4	18,5	130,4	42,8

[1] Extraído com NH_4O Ac 1N (pH 7,0).

[2] Obtido através de deslocamento em colunas (ADAMS, 1974).

APÊNDICE 29. Produção de matéria seca (raiz e parte aérea), do milho com 17 dias de idade, cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	Matéria seca					
	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
--- g/cm^3 ---	---------- g/vaso ----------					
Cruz Alta						
1,20	2,12	2,20	1,93	3,40	3,91	3,55
1,50	1,18	1,69	1,52	3,67	3,89	3,72
Santo Ângelo						
0,85	0,62	0,78	0,68	7,28	7,91	7,20
1,17	1,28	0,99	1,23	6,46	5,69	6,24

APÊNDICE 30. Comprimento e volume de raízes do milho com 17 dias de idade, cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	Comprimento de raízes			Volume de raízes		
	I	II	III	I	II	III
--- g/cm^3 ---	----- m/vaso -----			---- cm^3/vaso ----		
Cruz Alta						
1,20	446,5	418,5	431,6	21,6	23,5	21,2
1,50	311,4	282,0	318,8	13,1	17,7	16,0
Santo Ângelo						
0,85	181,6	192,1	171,2	10,7	10,1	11,2
1,17	215,2	207,9	177,8	12,9	9,5	10,9

APÊNDICE 31. Taxa de transpiração e quantidade total de água transpirada pelo milho em 17 dias de cultivo em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	Taxa de transpiração			Água transpirada		
	I	II	III	I	II	III
---- g/cm^3 ---	- ml/g de tecido -			---- ml/vaso		----
Cruz Alta						
1,20	114	130	143	628	791	782
1,50	166	149	157	807	833	825
Santo Ângelo						
0,85	130	126	125	1158	1249	1095
1,17	159	154	139	1229	1026	1040

APÊNDICE 32. Teor de K no tecido (parte aérea e raiz), do milho com 17 dias de idade, cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	K no tecido					
	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
--- g/cm^3 ---	---------- % ----------					
Cruz Alta						
1,20	1,79	1,71	1,66	4,58	3,96	4,04
1,50	1,56	1,44	1,86	3,51	3,50	3,75
Santo Ângelo						
0,85	2,90	3,19	2,98	5,11	5,18	4,68
1,17	2,51	2,31	2,03	4,04	4,55	3,43

APÊNDICE 33. Teor de Ca no tecido (raiz e parte aérea), do milho com 17 dias de idade, cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	Ca no tecido					
	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
--- g/cm^3 ---	---------- % ----------					
Cruz Alta						
1,20	0,66	0,66	0,56	1,07	1,00	1,03
1,50	0,54	0,55	0,61	0,97	0,89	0,91
Santo Ângelo						
0,85	0,62	0,61	0,63	0,71	0,69	0,61
1,17	0,31	0,29	0,33	0,61	0,70	0,61

APÊNDICE 34. Teor de Mg no tecido (raiz e parte aérea), do milho com 17 dias de idade, cultivado em duas densidades nos solos Cruz Alta e Santo Ângelo.

Densidade	Mg no tecido					
	Raiz			Parte aérea		
	I	II	III	I	II	III
--- g/cm^3 ---	---------- % ----------					
Cruz Alta						
1,20	0,52	0,47	0,46	0,83	0,73	0,71
1,50	0,44	0,46	0,49	0,72	0,73	0,72
Santo Ângelo						
0,85	0,34	0,36	0,35	0,49	0,46	0,41
1,17	0,25	0,26	0,26	0,46	0,45	0,47