

# DENSIDADE RADICULAR DO MILHO CONSIDERANDO OS ATRIBUTOS DE UM SOLO COM HORIZONTE B TEXTURAL<sup>(1)</sup>

J. A. ALBUQUERQUE<sup>(2)</sup> & D. J. REINERT<sup>(3)</sup>

## RESUMO

A absorção de água e nutrientes pelas plantas depende de vários fatores, principalmente do volume de solo explorado pelas raízes. Determinados fatores e, ou, processos ocorridos no solo podem limitar o crescimento das raízes. Este estudo objetivou: (a) quantificar as relações entre densidade radicular da cultura do milho e alguns atributos de um Argissolo Vermelho distrófico arênico e identificar quais desses atributos restringem o crescimento de raízes no horizonte B<sub>t</sub> e a produtividade do milho; (b) monitorar a variação temporal de água no solo para avaliar a extração de água do horizonte B<sub>t</sub>. O estudo foi realizado com milho no sistema plantio direto, no ano agrícola de 93/94, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico, localizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria. Foram analisados a microporosidade, macroporosidade, porosidade total, densidade do solo, espaço aéreo, textura, concreções, resistência à penetração, cálcio + magnésio, saturação por alumínio, densidade radicular e produtividade do milho. Observando os perfis culturais e a densidade radicular, percebeu-se que o horizonte B<sub>t</sub> restringiu o crescimento radicular, principalmente nos perfis com horizonte A raso, quando comparados aos perfis com horizonte A profundo. A densidade do solo e a resistência à penetração não restringiram o crescimento radicular nas condições estudadas; já a presença de concreções e a elevada saturação por alumínio trocável foram as variáveis que mais restringiram o crescimento radicular. Não foi observada redução da umidade volumétrica do horizonte B<sub>t</sub> durante o ciclo de crescimento do milho, mesmo em prolongado período de déficit hídrico, indicando que a água presente neste horizonte não foi absorvida pela cultura, considerando a baixa densidade radicular neste horizonte. A produtividade de grãos de milho foi reduzida em 23% nos perfis com horizonte A raso, comparado aos perfis com horizonte A profundo, provavelmente por causa da restrição ao crescimento radicular.

**Termos de indexação:** crescimento de raízes; absorção de água; produtividade do milho.

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em maio de 2000 e aprovado em fevereiro de 2001.

<sup>(2)</sup> Professor do Departamento de Solos, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Campus III, Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). E-mail: a2ja@cav.udesc.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97119-900 Camobi, Santa Maria (RS). Pesquisador do CNPq.

### **SUMMARY: RESTRICTION TO ROOT GROWTH IN THE B TEXTURAL HORIZON**

*Plant water and nutrient uptake depends on several factors, mainly on the soil depth explored by the roots. Some soil factors and processes can limit root growth. The objectives of this study were: (a) to quantify the relationships among corn root density with several soil properties and to identify which of these attributes restrict root growth in the B<sub>t</sub> horizon and corn yield; (b) to measure the temporal variation of the soil water content to verify if plants extract water from the B<sub>t</sub> horizon. The study was carried out with corn under no tillage during the 93/94 growing season at the Federal University of Santa Maria on a Typic Hapludalf soil. Porosity, bulk density, aerial space, texture, gravel, resistance to penetration, calcium + magnesium, saturation with aluminum, root density and corn yield were analyzed. Through the observation of the cultural profiles and root density, it was noticed that the horizon B<sub>t</sub> restricted root growth, mainly in the profiles with shallow A horizon when compared to deep A horizon. The soil bulk density and resistance to penetration did not restrict root growth. Conversely, the gravel presence and the high saturation with exchangeable aluminum were the variables that strongly restrict root growth. Reduction of the moisture content of the B<sub>t</sub> horizon was not observed during the corn growth, even under dry conditions, indicating that low root density probably prevented the plants to take up water in the B<sub>t</sub> horizon. Corn yield was 23% lower in the profiles with shallow A horizon than in profiles with deep A horizon. This yield decrease was probably a function of the restriction to the root growth.*

*Index terms: soil properties, water uptake, corn yield.*

### **INTRODUÇÃO**

A densidade e a distribuição de raízes são indicativos da qualidade do solo para o crescimento das plantas e dependem de alguns atributos determinantes dos processos de absorção de água e nutrientes (Oussible et al., 1992; Eghball & Maranville, 1993). Para entender as variações na produtividade das culturas, no espaço e no tempo, são necessários estudos que avaliem as propriedades do solo e suas relações com o crescimento radicular (Veen & Boone, 1990; Pagès & Pellerin, 1994).

Em um Argissolo Vermelho distrófico arênico da área experimental do Departamento de Solos da UFSM, observou-se que o crescimento e a produção de matéria seca e de grãos da cultura do milho estavam sendo restringidos, pois as raízes da cultura não penetravam no horizonte B<sub>t</sub>. Estudos anteriores indicaram que esta restrição estava relacionada com a menor espessura do horizonte A, porém os processos ou fatores que causavam restrições à cultura, embora não conhecidos (Albuquerque et al., 1996; Fiorin et al., 1997), reduziam a produtividade das culturas (Langdale et al., 1979; Swan et al., 1987; Albuquerque et al., 1994).

Alguns atributos do solo que alteram o crescimento radicular são: temperatura, umidade, energia de retenção da água, textura, densidade do solo, distribuição de tamanho de poros, resistência do solo à penetração, acidez e fertilidade do solo (Logsdon et al., 1987; Veen & Boone, 1990).

A menor produção verificada em Podzólicos (Argissolos) com horizonte A pouco "profundo" é devida às forças de capilaridade e adsorção, visto que a água existente no horizonte B textural não ascende para o horizonte A, mais arenoso, onde estão concentradas as raízes (Fiorin et al., 1997). A restrição ao crescimento radicular reduz mais a produtividade das culturas em anos em que ocorre déficit hídrico (Langdale et al., 1979; Swan et al., 1987; Fiorin et al., 1997), pois, quando camadas adensadas ocorrem próximas à superfície do solo, verifica-se concentração de raízes acima dessas camadas (Oussible et al., 1992; Rosolem et al., 1994).

Nos casos em que ocorre restrição ao crescimento radicular, a erosão hídrica reduz ainda mais o volume de solo explorado pelas raízes (Nizeyimana & Olson, 1988) e, conseqüentemente, o teor de água e nutrientes disponíveis, principal mecanismo pelo qual a erosão diminui a produtividade do solo (Willians et al., 1981).

Um dos principais atributos físicos que reduz a produtividade das culturas é a densidade do solo e sua relação com a resistência à penetração. O aumento da densidade do solo geralmente acarreta maior resistência à penetração (Vyn & Raimbault, 1993; Rosolem et al., 1994), propriedade esta também influenciada pela umidade e textura. Rosolem et al. (1994) observaram que o aumento da densidade do solo de 1,03 para 1,72 g cm<sup>-3</sup> aumentou a resistência à penetração de 0,05 para 2,0 MPa, causando total impedimento ao crescimento de raízes de milho.

Segundo Gerard et al. (1982), com o aumento do teor de argila, a resistência crítica que cessa a elongação radicular torna-se menor. Todavia, o efeito da diminuição da resistência crítica nos solos mais argilosos pode ser amenizado com a maior retenção de água nesses solos, também observada em subsolos argilosos.

Logsdon et al. (1987) determinaram que a redução do potencial matricial de água no solo de -0,2 para -1,1 MPa diminuiu significativamente o crescimento radicular de plantas de milho, avaliado seis dias após a emergência. Logsdon et al. (1987) e Veen & Boone (1990) verificaram que o aumento da resistência mecânica reduziu o comprimento radicular, porém aumentou o raio das raízes. Afirmaram que este aumento do raio pode ser devido ao menor crescimento de raízes laterais que mostram raio menor do que as raízes principais. O aumento no raio das raízes torna-se mais problemático, pois, em geral, a compactação também diminui o tamanho dos poros. Conforme Hill & Cruse (1985), quando a densidade do solo aumenta, verifica-se uma redução do volume de poros maiores, bem como um aumento do volume de poros menores que 15  $\mu\text{m}$  de raio.

A hipótese deste estudo é de que a água existente no horizonte B textural não está disponível para as culturas, já que as raízes dificilmente penetram nesse horizonte e o movimento ascendente de água para o horizonte A pode ser limitado.

Os objetivos do trabalho foram: (a) quantificar as relações entre densidade radicular da cultura do milho e alguns atributos de um Argissolo Vermelho distrófico arênico e identificar quais desses atributos restringem o crescimento de raízes no horizonte B<sub>t</sub> e a produtividade do milho; (b) monitorar a variação temporal de água no solo para avaliar se as plantas extraem água do horizonte B<sub>t</sub>.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na área do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais, no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS), região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul. A latitude do local é de 29°41' S, a longitude de 53°48' W e a altitude de 95 m. O clima do local, segundo a classificação de Köppen, é Cfa, temperado moderado chuvoso, com a temperatura do mês mais frio entre -3 e 18°C e a temperatura do mês mais quente superior a 22°C. A precipitação média anual varia de 1.322 a 1.769 mm (Moreno, 1961).

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico arênico (EMBRAPA, 1999), anteriormente classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo Tb distrófico (Brasil, 1973); apresenta declividade de 0,06 m m<sup>-1</sup>, textura superficial franco-arenosa e

subsuperficial franco-argilosa. A descrição geral e morfológica de um perfil localizado na área experimental foi realizada por Fiorin (1993).

A área do experimento, de 2 ha, foi subdividida em cinco faixas através de terraços de base média e cultivada no sistema plantio direto a partir de 1989. Em 1988, antes da instalação do sistema plantio direto, a acidez do solo foi corrigida para pH próximo a 6,0.

O presente estudo foi iniciado em maio de 1993, com a semeadura de aveia consorciada com ervilhaca em todas as cinco faixas entre terraços. Na quarta faixa, na fase de floração, foi aplicado dessecante foliar para interromper o crescimento da aveia. O milho foi semeado em 8 de outubro de 1993 (cultivar CARGIL 511 A), com um espaçamento de 1 m entre linhas e seis sementes por metro linear. A adubação do milho constou de 250 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 5-20-20, incorporado ao solo no momento da semeadura. No estádio V10 da cultura, foram distribuídos 100 kg ha<sup>-1</sup> de uréia na linha de semeadura. O controle de plantas daninhas foi efetuado com o herbicida TRIAMEX na dose de 5 L ha<sup>-1</sup>, aplicado em 27 de outubro de 1993.

Com base no estudo de Albuquerque et al. (1992), foram selecionados quatro pontos de observação: dois com horizonte A "profundo" (profundo 1 e profundo 2), com a transição entre o horizonte A ou E e o B textural aos 0,80 m, e dois com horizonte A "raso" (raso 1 e raso 2), com a transição entre o horizonte A ou E e o B textural aos 0,40 m. Os perfis foram abertos e as coletas de solo e raízes realizadas de 05 a 12 de janeiro de 1994, no estádio do pendoamento da cultura do milho, período no qual, segundo Mengel & Barber (1974), o sistema radicular do milho alcança a máxima extensão.

Nos pontos "profundos", os perfis tiveram 1,2 m de profundidade e, nos pontos "rasos", 0,7 m. O perfil analisado foi perpendicular à linha de semeadura de milho, com a parede vertical do perfil distante de 3 cm da planta de milho. Foi utilizada uma faca para retirar uma camada de solo de 1,5 cm do perfil, expondo cuidadosamente as raízes. Após a exposição das raízes, um quadro com 1,0 m de lado, subdividido com fio de náilon formando uma malha de 5 x 5 cm foi utilizado para desenhar a distribuição radicular no perfil.

Nos pontos com horizonte A "profundo", foram coletadas amostras nas profundidades de 0,20, 0,45, 0,70 e 0,90 m e, nos pontos com horizonte A "raso", foram coletadas amostras nas profundidades de 0,20, 0,45 e 0,60 m, demarcadas conforme a profundidade e espessura dos horizontes do solo. Em cada profundidade, foram demarcados dois pontos para coleta, um à esquerda e outro à direita da linha de plantio (planta). Portanto, para cada perfil "profundo", foram amostrados oito pontos e, para cada perfil "raso", seis pontos, totalizando 28 amostras.

Para as determinações químicas, textura e densidade de partículas, foi coletada em cada ponto uma amostra de aproximadamente 1,5 kg de solo com estrutura deformada. Para avaliar a macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, foram coletadas em cada ponto três amostras indeformadas em torrões e, para determinar a densidade radicular e a percentagem de concreções no solo, foram coletadas em cada ponto amostras com 15 cm de largura, 15 de comprimento e 10 de altura, totalizando um volume de 2.250 cm<sup>3</sup>.

O alumínio e o cálcio + magnésio foram obtidos segundo EMBRAPA (1979). A granulometria foi determinada por meio do método do densímetro. A densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo pelo método do torrão parafinado (EMBRAPA, 1979). A porosidade total foi calculada, utilizando a seguinte fórmula:

$$PT = 1 - \left( \frac{D_s}{D_p} \right) * 100 \quad (1)$$

em que PT é a porosidade total (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), D<sub>s</sub> é a densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>) e D<sub>p</sub> a densidade de partículas (g cm<sup>-3</sup>). A microporosidade foi obtida por meio da determinação da umidade dos torrões, submetidos a uma tensão de 0,006 MPa. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 1979).

A umidade volumétrica foi monitorada da semeadura até a maturação fisiológica do milho, nas profundidades de 0,10, 0,25, 0,46, 0,70 e 0,93 m. Para isso, foram instalados tubos de acesso para a sonda de nêutrons, dois na área com horizonte A "raso" e dois na área com A "profundo". O número de contagens da sonda de nêutrons foi convertido em umidade volumétrica mediante a calibração realizada na área deste estudo (Fiorin, 1993). O espaço aéreo, a diferença entre a porosidade total e a umidade volumétrica foram calculados para a profundidade de 0,45 m, profundidade máxima em que foram observadas raízes nos perfis com horizonte A "raso".

A resistência à penetração foi determinada com um penetrômetro de bolso, marca Soiltest Inc. modelo CL-700, com graduação de 0-5 kg cm<sup>-2</sup>. Determinou-se a máxima força necessária para que a extremidade cilíndrica com 4,8 mm de diâmetro penetrasse 5 mm dentro do solo. Em cada ponto de amostragem, foram realizadas dez leituras para comporem um valor médio de resistência à penetração.

As raízes e as concreções foram separadas da massa de solo, utilizando um jogo de três peneiras sobrepostas com diâmetros de 2,0, 1,0 e 0,5 mm. As concreções, após serem separadas do solo, foram lavadas em solução de hidróxido de sódio, para

retirar o solo aderido, e secas em estufa a 105°C. A massa de concreções foi expressa em relação ao peso total da amostra.

O solo com raízes foi colocado na peneira superior e, com jatos de água, foram separadas, cuidadosamente, as raízes do solo. As raízes foram colocadas em saco plástico que continha uma parte de álcool e duas partes de água para a conservação até à contagem. Para estimar o comprimento radicular, utilizou-se o método da interseção de Newman modificado por Tennant (1975) por meio da seguinte fórmula:

$$R = N * \frac{11}{14} * UQ \quad (2)$$

em que UQ é a unidade do quadriculado (2 cm) e N é o número de interseções, sendo R = N \* 1,5714. O resultado expresso em unidade de comprimento radicular (cm) foi dividido pelo volume da amostra de solo (2.250 cm<sup>3</sup>), resultando em comprimento de raízes por volume de solo (cm cm<sup>-3</sup>).

A colheita do milho foi realizada em 15 de março de 1994, em áreas próximas a cada perfil, em três fileiras com 10 m de comprimento, totalizando uma área de 30 m<sup>2</sup>.

Os dados foram analisados por meio de regressão linear simples e múltipla pelo método "stepwise" (SAS, 1990).

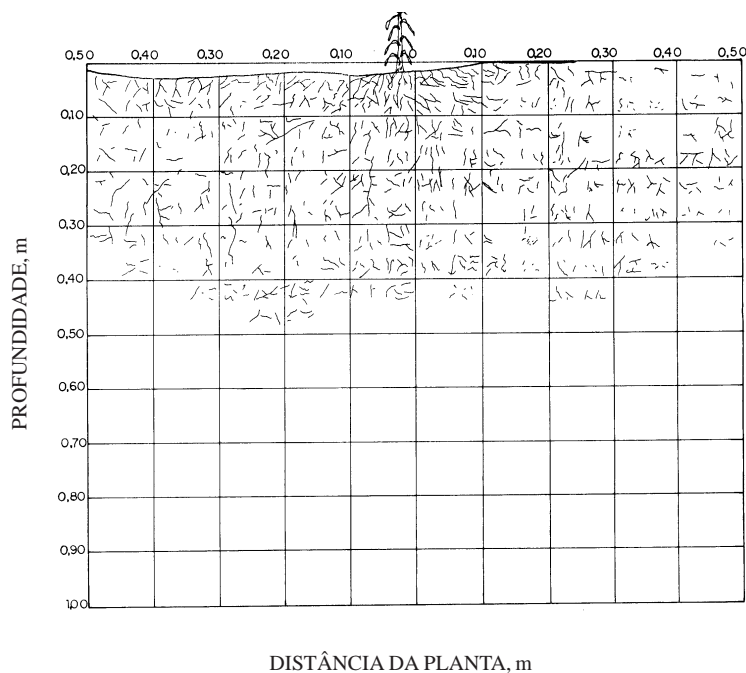
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade radicular do milho foi reduzida com a profundidade, de 2,51 cm cm<sup>-3</sup> na profundidade de 0,20 m para 0,21 cm cm<sup>-3</sup> na profundidade de 0,95 m (Quadro 1), valores semelhantes aos observados em outros estudos. Silva et al. (2000) em um Podzólico Vermelho-Amarelo, considerando a média dos sistemas de preparo convencional e plantio direto, observaram uma densidade radicular de 3,0 cm cm<sup>-3</sup> aos 0,02 m, 1,0 cm cm<sup>-3</sup> aos 0,22 m e 0,5 cm cm<sup>-3</sup> aos 0,37 m de profundidade. Em um Podzólico Vermelho-Escuro no Rio Grande do Sul, Mello Ivo & Mielniczuk (1999), na camada de 0,25 a 0,35 m, observaram uma densidade radicular de 1,7 cm cm<sup>-3</sup>, no preparo convencional, e de 1,8 cm cm<sup>-3</sup>, no plantio direto.

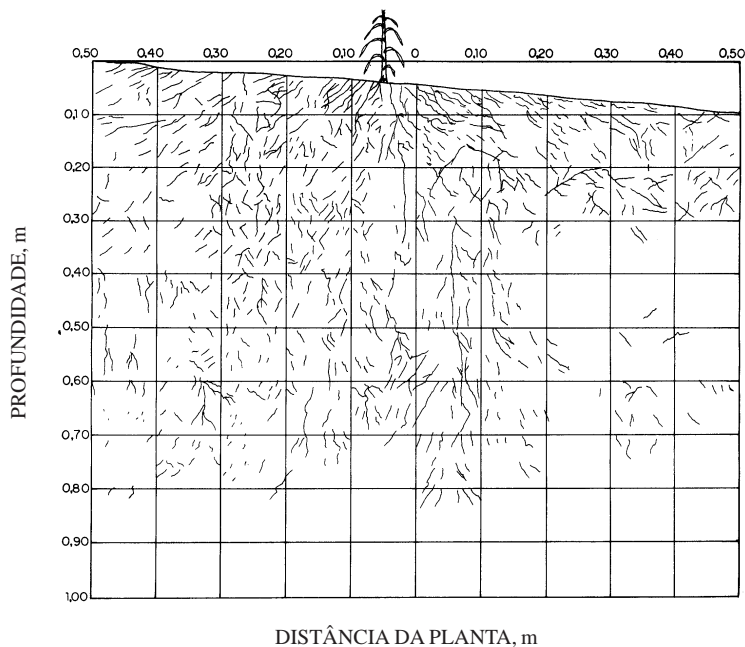
Foi observada restrição ao crescimento das raízes nos dois perfis "rasos", onde o horizonte B textural (B<sub>t</sub>), ou uma camada concrecionária, foi detectado aos 0,4 m da superfície (Figura 1). Nos dois perfis com horizonte A "profundo", o horizonte B<sub>t</sub> iniciou aos 0,8 m de profundidade. Nestes perfis, apesar de as raízes terem penetrado pouco no horizonte B<sub>t</sub> (Figura 2), o volume de solo explorado pelas raízes e, portanto, o suprimento de nutrientes e água para as plantas foram superiores aos dos perfis com horizonte A "raso".

**Quadro 1. Profundidade de coleta, horizonte, densidade radicular (DR), cálcio mais magnésio, saturação por alumínio (m), microporosidade (Mic), macroporosidade (Mac), porosidade total (PT), densidade do solo (Ds), concreções, argila, silte, areia e resistência à penetração (RP), nos perfis profundos e rasos do Argissolo Vermelho distrófico arênico. Cada valor representa a média das determinações realizadas à esquerda e à direita da planta**

Profundidade	Horizonte	DR	Ca + Mg	m	Mic	Mac	PT	Ds	Concentração	Argila	Silte	Areia	RP
m		cm cm <sup>-3</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	%	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>		g cm <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>				kg cm <sup>-2</sup>
Perfil profundo 1													
0,20	A <sub>2</sub>	2,51	3,8	0	0,22	0,12	0,34	1,71	1	109	244	648	5,00
0,45	E	0,91	3,0	21	0,21	0,18	0,39	1,57	22	131	261	607	4,00
0,70	BE	0,70	1,9	50	0,29	0,12	0,41	1,55	157	271	268	461	2,99
0,90	B <sub>t</sub>	0,22	1,9	57	0,29	0,09	0,38	1,62	278	295	284	421	2,61
Perfil profundo 2													
0,20	A <sub>2</sub>	1,48	2,8	22	0,23	0,12	0,35	1,69	1	129	238	633	5,00
0,45	E	0,40	2,8	21	0,21	0,22	0,43	1,47	1	126	260	614	3,04
0,70	BE	0,43	2,0	34	0,22	0,14	0,36	1,66	193	151	272	577	3,04
0,90	B <sub>t</sub>	0,21	2,9	44	0,32	0,09	0,41	1,53	76	345	233	422	2,68
Perfil raso 1													
0,20	A <sub>2</sub>	0,99	3,0	47	0,28	0,16	0,44	1,41	40	253	251	497	4,88
0,45	B <sub>t</sub>	0,48	3,1	67	0,41	0,07	0,48	1,39	100	538	265	198	3,74
0,60	B <sub>t</sub>	0,45	3,5	71	0,44	0,07	0,51	1,29	70	610	275	115	3,34
Perfil raso 2													
0,20	A <sub>2</sub>	1,43	2,9	52	0,34	0,07	0,41	1,52	16	289	225	486	4,73
0,45	B <sub>t</sub>	0,63	4,0	55	0,41	0,09	0,50	1,32	157	520	275	205	3,52
0,60	B <sub>t</sub>	0,63	3,5	65	0,41	0,09	0,50	1,32	108	529	311	160	3,51



**Figura 1. Distribuição radicular da cultura do milho no perfil cultural com horizonte A raso. Espessura dos horizontes: Ap<sub>1</sub>: 0-0,18 m; A<sub>2</sub>: 0,18-0,30 m; E: 0,30-0,45 m; B<sub>t</sub>: 0,45-0,70 m; C: 0,70 m<sup>+</sup>.**



**Figura 2. Distribuição radicular da cultura do milho no perfil cultural com horizonte A profundo. Espessura dos horizontes: Ap1: 0-0,18 m; A2: 0,18-0,45 m; E: 0,45-0,70 m; BE: 0,70-0,83 m; B<sub>t</sub>: 0,83 m<sup>+</sup>.**

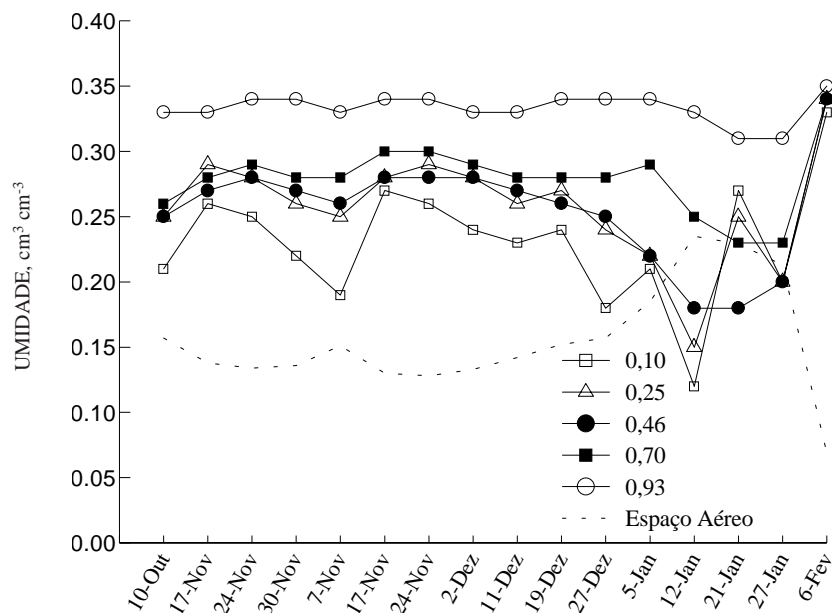
Observou-se, visualmente, que as plantas de milho apresentavam enrolamento de folhas apenas na área com horizonte A “raso”. O sintoma de estresse hídrico foi observado, pois ocorreu um período prolongado sem precipitação, que iniciou no final de dezembro e se estendeu até o final de janeiro, reduzindo, sensivelmente, a umidade do solo nas camadas superficiais, para valores próximos a  $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , nos perfis rasos, e  $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , nos profundos (Figuras 3 e 4). Dado o período de estiagem, as maiores umidades foram observadas nas camadas mais profundas de ambos os perfis avaliados, com valores próximos a  $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , nos perfis rasos e  $0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , nos perfis profundos (Figuras 3 e 4). A umidade nas camadas mais profundas não variou ao longo do período monitorado, possivelmente, pela ausência de raízes e baixa ascensão de água por capilaridade. Constatou-se que a restrição ao crescimento de raízes no horizonte B<sub>t</sub> não foi devida à falta de umidade, já que, nas camadas mais profundas, a umidade foi maior do que nas camadas mais rasas.

As maiores flutuações da umidade do solo foram verificadas nos perfis com horizonte A raso (Figura 3), o que provavelmente está relacionado não só com a maior extração de água pelas plantas de milho na camada superficial de solo em períodos de déficit hídrico, mas também com a menor redistribuição da água para camadas mais profundas em períodos de maior precipitação, considerando a menor condutividade hidráulica do horizonte B textural.

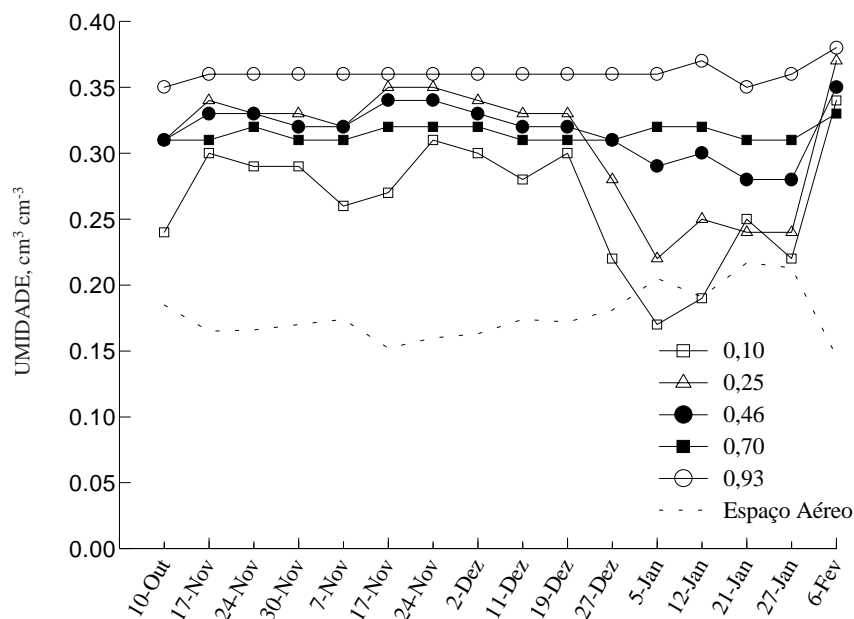
Em todo o período monitorado, nos perfis com horizonte A raso e profundo, o espaço aéreo na profundidade de 0,45 m foi superior ao valor considerado crítico ao crescimento de raízes, de  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Figuras 3 e 4). Durante os meses de outubro e novembro, período de maior taxa de crescimento da cultura, a umidade no horizonte B textural dos perfis rasos foi alta, resultando num espaço aéreo próximo a  $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Figura 3). Este baixo espaço aéreo pode ser o responsável pela redução no crescimento de raízes, pois, com a profundidade, a taxa de difusão de oxigênio diminui mesmo em solos com elevada macroporosidade (Hillel, 1980). Segundo Glinski & Lipiec (1990), raízes de plantas que não toleram déficit de oxigênio evitam crescer em zonas com quantidades baixas deste elemento.

O maior volume de microporos com a profundidade deveu-se ao maior teor de argila no horizonte B textural (Quadro 1 e Figura 5). No perfil raso 1, a microporosidade variou de 0,28, no horizonte A, para  $0,44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , no B textural, enquanto a quantidade de macroporos neste horizonte foi menor do que  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

O diâmetro médio das raízes principais e laterais de primeira ordem de milho, segundo Glinski & Lipiec (1990), mede, respectivamente, 1.037 e 314  $\mu\text{m}$  em perfis com baixa densidade do solo e 2.208 e 640  $\mu\text{m}$  em solo severamente compactado. Portanto, as raízes principais e laterais de primeira ordem dificilmente crescem em microporos ( $< 48 \mu\text{m}$ ) predominantes no horizonte B<sub>t</sub> dos perfis avaliados (Quadro 1). Segundo Glinski & Lipiec (1990), em



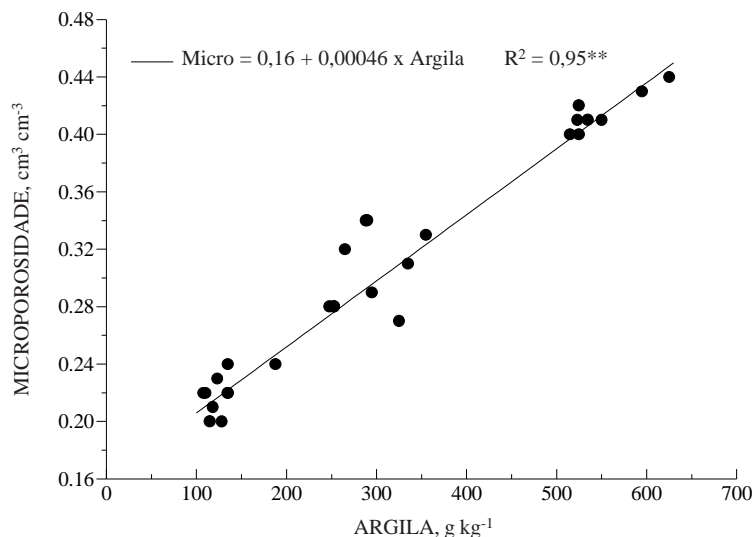
**Figura 3.** Variação temporal da umidade do solo determinada a 0,10, 0,25, 0,46, 0,70 e 0,93 m de profundidade e espaço aéreo na camada de 0,45 m. Cada ponto é a média das leituras dos dois perfis com horizonte A raso.



**Figura 4.** Variação temporal da umidade do solo determinada a 0,10, 0,25, 0,46, 0,70 e 0,93 m de profundidade e espaço aéreo na camada de 0,45 m. Cada ponto é a média das leituras dos dois perfis com horizonte A profundo.

sistemas rígidos, ou seja, sem expansão, raízes de milho não crescem em poros com diâmetro menor que 138  $\mu\text{m}$  de diâmetro; todavia, em sistemas não-rígidos, que apresentam expansão, podem crescer em poros de 46  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Assim, se considerar que no subsolo o ambiente está mais rígido, o crescimento de raízes em microporos é dificultado.

É importante ressaltar que, dependendo do diâmetro médio das raízes principais e laterais de primeira ordem de milho, pode haver restrição ao crescimento radicular no horizonte B<sub>1</sub> nos perfis com horizonte A "raso". Isso se deve à interação de fatores como a presença de concreções, elevado teor de argila e baixa quantidade de macroporos e espaço aéreo.



**Figura 5. Relação entre a microporosidade e os teores de argila do solo dos perfis profundos e rasos no Argissolo Vermelho distrófico arênico. n = 28 pares, \*\* significativo a 1% pelo teste t.**

Outro fator que pode restringir o crescimento das raízes é a presença de camadas compactadas. Os valores de densidade do solo variaram de 1,29 a 1,71 g cm<sup>-3</sup> (Quadro 1). Nos perfis com horizonte A raso, as maiores densidades do solo foram observadas no horizonte A, enquanto, nos perfis com horizonte A profundo, a densidade do solo foi alta em todas as camadas analisadas. Observou-se que a densidade do solo não restringiu o crescimento radicular, pois mesmo onde foi observada densidade do solo elevada, a densidade radicular foi alta, como ocorreu na primeira camada do perfil profundo 1 (Quadros 1 e 2).

O aumento da densidade do solo geralmente eleva a resistência à penetração. A resistência do solo à penetração foi superior a 2,6 kg cm<sup>-2</sup> e na superfície chegou ao limite máximo do penetrômetro de bolso utilizado, 5 kg cm<sup>-2</sup> (Quadro 1), valores que podem causar restrição ao crescimento de raízes. Deve-se considerar, porém, que, no momento da determinação da resistência à penetração, a superfície do solo estava com pouca umidade (Figuras 3 e 4).

No trabalho realizado por Taylor & Gardner (1963) para a densidade do solo de 1,7 g cm<sup>-3</sup> em dois potenciais de água no solo, -0,020 e -0,067 MPa, a resistência do solo foi, respectivamente, de 0,8 e 3,0 MPa. Estes autores observaram que o aumento na resistência do solo reduziu a penetração de raízes de algodão para valores próximos a zero. Veen & Boone (1990) relataram que as raízes de milho cessaram o crescimento quando a resistência à penetração alcançou 4,7 MPa ou quando o potencial matricial de água foi inferior a -1,7 MPa. Em Latossolo Argiloso, Cintra & Mielniczuk (1983) e Alvarenga et al. (1996) observaram restrição ao crescimento das raízes quando a resistência à penetração foi de 1,08 e 1,47 MPa, respectivamente.

Já Rosolem et al. (1994), em Latossolo arenoso, observaram tal efeito para valores próximos a 2,0 MPa.

Segundo Bowen et al. (1994), raízes de várias culturas desenvolvem pressões na direção axial de 0,9 a 1,5 MPa. O milho desenvolve pressões de 1,22 MPa na direção axial e de 0,67 a 0,71 MPa na direção radial. Nesses estudos, as relações entre a umidade, densidade do solo, textura e resistência à penetração mostraram-se complexas. Vale destacar que a comparação dos resultados da literatura com os encontrados neste estudo não é possível por serem o equipamento e as unidades utilizadas para expressar a resistência à penetração diferentes.

A presença de concreções reduziu o crescimento radicular (Figura 6), pois, nas amostras com mais de 100 g de concreções kg<sup>-1</sup> de solo, a densidade radicular foi menor que 1 cm cm<sup>-3</sup>, e, nas amostras com menos de 100 g kg<sup>-1</sup>, a densidade radicular foi variável. As concreções obstruem o crescimento radicular e desviam sua trajetória de crescimento (Pagès & Pellerin, 1994). Em horizontes ou camadas com concreções, o volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, a disponibilidade de água e nutrientes são reduzidos. Nas amostras avaliadas, várias apresentaram mais de 100 g kg<sup>-1</sup> de concreções.

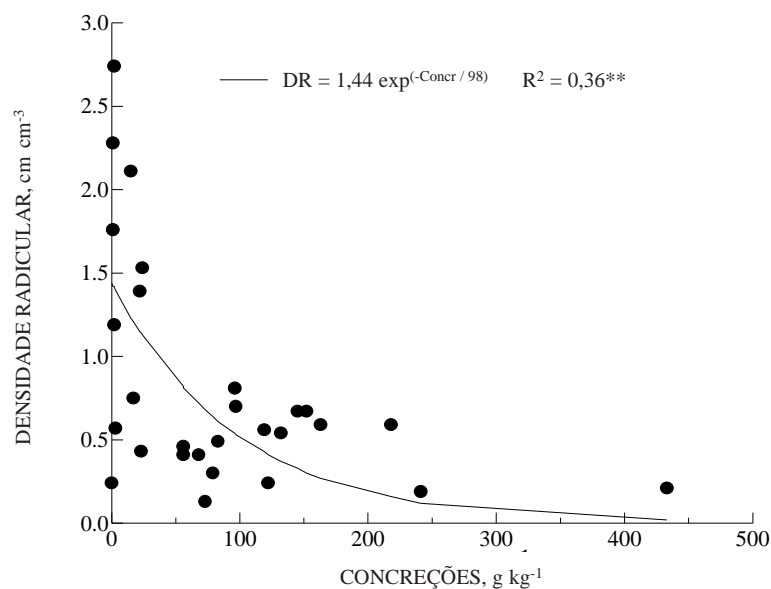
A saturação por alumínio foi maior que 50% no horizonte B<sub>t</sub>, principalmente nos perfis com horizonte A raso, com valores de 55 a 71% (Quadro 1) e apresentou relação negativa com a densidade radicular (Quadro 2). Os teores de cálcio mais magnésio variaram de 1,9 a 4,0 cmol kg<sup>-1</sup> e não apresentaram relação com a densidade radicular. Na análise dos coeficientes de correlação, observou-se que nenhuma propriedade isolada foi responsável pela restrição ao crescimento das raízes no horizonte B textural.



**Quadro 2. Coeficiente linear (a) e angular (b) da equação da reta ajustada, coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o nível de significância (p), sendo (X) as propriedades do Argissolo Vermelho distrófico arênico e (Y) a densidade radicular. Foram utilizados 28 pares de dados**

Coeficiente	Ca + Mg	m <sup>(1)</sup>	Mic <sup>(2)</sup>	Mac <sup>(3)</sup>	PT <sup>(4)</sup>	Ds <sup>(5)</sup>	Argila	Silte	Areia	RP <sup>(6)</sup>
a	(7)	1,38	(7)	(7)	0,04	0,13	1,30	3,69	0,14	-1,34
b		-0,01			-3,40	4,27	0,001	-0,01	0,001	0,58
R <sup>2</sup>		0,17			0,26	0,20	0,16	0,15	0,18	0,59
p		0,02			0,01	0,02	0,04	0,04	0,02	0,001

(1) Saturação por alumínio. (2) Microporosidade. (3) Macroporosidade. (4) Porosidade total. (5) Densidade do solo (Ds). (6) Resistência à penetração. (7) Não-significativo (p = 0,05).



**Figura 6. Relação entre a densidade radicular e os teores de concreções no solo, dos perfis profundos e rasos no Argissolo Vermelho distrófico arênico. n = 28 pares, \*\* significativo a 1% pelo teste t.**

A análise por regressão múltipla indicou que a densidade radicular (DR) foi maior quando a quantidade de concreções (concr) foi menor e a densidade do solo (Ds) maior ( $DR = -2,1 - 0,003 * Concr + 2,15 * Ds$ ;  $R^2 = 0,37$ ;  $p = 0,003$ ). A relação positiva entre densidade radicular e densidade do solo foi observada, pois ambos foram altos na superfície onde as raízes se concentraram e diminuíram em profundidade, principalmente nos perfis com horizonte A “raso”.

O maior crescimento de raízes em profundidade resultou em aumento da produtividade do milho nos perfis com horizonte A “profundo”. Na área onde estão localizados os perfis com horizonte A “raso”, a produtividade de grãos foi de  $3.916 \text{ kg ha}^{-1}$  e, nas áreas com horizonte A “profundo”, foi de  $5.085 \text{ kg ha}^{-1}$ , diferença de  $1.169 \text{ kg ha}^{-1}$  (23% menor). Considerando a profundidade média de crescimento de raízes de

$0,45 \text{ m}$  para o horizonte A raso, e de  $0,80 \text{ m}$ , para o horizonte A profundo (Figuras 1 e 2), para cada centímetro de solo a menos explorado pelas raízes, a produtividade do milho foi reduzida em  $35 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Na mesma área, Albuquerque et al. (1996) observaram, no ano agrícola de 1991/92, que, para cada centímetro a menos de horizonte A, a produtividade do milho foi reduzida em  $43 \text{ kg ha}^{-1}$ . Langdale et al. (1979), em uma pequena bacia hidrográfica com os solos Hapludult e Dystrochrept, observaram que a produtividade do milho foi de  $5.300 \text{ kg ha}^{-1}$ , quando a espessura do horizonte A era de  $0,40 \text{ m}$ , e de  $3.100 \text{ kg ha}^{-1}$ , quando a espessura era de  $0,25 \text{ m}$ , uma redução de  $147 \text{ kg ha}^{-1}$  para cada centímetro a menos de horizonte A. Mokma & Sietz (1992) observaram em um Hapludalf, em um período de cinco anos, que a produtividade do milho em solo severamente erodido foi 21% inferior à produtividade

obtida para solo ligeiramente erodido. Nos dois últimos estudos, a produtividade foi menor em anos que ocorreram déficit hídrico.

Esta diferença está relacionada com o maior volume de solo explorado pelas raízes na área com horizonte A profundo, pois, segundo Eghball & Maranville (1993), a restrição ao crescimento radicular diminui o acesso à água e nutrientes e, conseqüentemente, a produtividade. Segundo Swan et al. (1987), Mokma & Sietz (1992) e Fiorin et al. (1997), a redução do crescimento radicular e, conseqüentemente, da produtividade do milho é mais acentuada em anos de déficit hídrico.

## CONCLUSÕES

1. O crescimento radicular da cultura do milho no horizonte B textural foi restringido pela pequena quantidade de macroporos, presença de concreções e elevada saturação por alumínio, porém a elevada densidade do solo e resistência à penetração não afetaram o sistema radicular do milho.

2. A umidade do solo no horizonte B textural não variou durante o período monitorado, decorrente da pequena presença de raízes e do reduzido fenômeno da capilaridade ocorrido do horizonte B para o A.

3. A restrição ao crescimento radicular reduziu a produtividade de grãos de milho em 1.169 kg ha<sup>-1</sup> nos perfis com horizonte A raso, 35 kg ha<sup>-1</sup> para cada centímetro a menos de espessura de horizonte A explorado pelas raízes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Alberto Inda Júnior e Flávio Fontinelli, pelo auxílio na coleta das amostras e determinações físicas.

## LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A.; FIORIN, J.E. & REINERT, D.J. Variabilidade espacial de propriedades do solo e produção de milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21; SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DO CONE SUL, 1., Santa Maria, 1992. Anais. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. p.417-430.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; DEBARBA, L. & AMADO, T.J.C. Variabilidade espacial em parcelas experimentais de perda de água e solo por chuva natural. Ci. Rural, 24:269-273, 1994.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J. & FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 20:151-157, 1996.
- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W. & REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. R. Bras. Ci. Solo, 20:319-326, 1996.
- BOWEN, H.D.; GARNER, T.H. & VAUGHN, D.H. Advances in soil-plant dynamics. In: De VORE-HANSEN, P., ed. Advances in soil dynamics. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1994. p.255-280.
- BRASIL. Ministério da agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife: 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30)
- CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. R. Bras. Ci. Solo, 7:197-201, 1983.
- EGHBALL, B. & MARANVILLE, J.W. Root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined drought and nitrogen stresses. Agron. J., 85:147-152, 1993.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de métodos de análise de solo. 2ed. Rio de Janeiro, 1979. não paginado.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa produção de informações; Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FIORIN, J.E. Armazenamento de água no solo, crescimento e produção do milho e teste de modelo de simulação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1993. 128p. (Tese de Mestrado)
- FIORIN, J.E.; REINERT, D.J. & ALBUQUERQUE, J.A. Armazenamento de água no solo e produtividade da cultura do milho em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 21:249-255, 1997.
- GERARD, C.J., SEXTON, P. & SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. Agron. J., 74:875-879, 1982.
- GLINSKI, J. & LIPIEC, J. Soil physical conditions and plant roots. Boca Raton, CRC Press, 1990. 250p.
- HILL, R.L. & CRUSE, R.M. Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisols. Soil Sci. Soc. Am. J., 49:1270-1273, 1985.
- HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. London, Academic press, 1980. 413p.
- LANGDALE, G.W.; BOX, J.E. & LEONARD, R.A. Corn yield reduction on eroded southern piedmont soils. J. Soil Water Cons., 34:226-228, 1979.
- LOGSDON, S.D.; RENEAU, R.B. & PARKER, J.C. Corn seedling root growth as influenced by soil physical properties. Agron. J., 79:221-224, 1987.
- MELLO IVO, W.M.P. & MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. R. Bras. Ci. Solo, 23:135-143, 1999.

- MENGEL, D.B. & BARBER, S.A. Development and distribution of the corn root under field conditions. *Agron. J.*, 66:341-344, 1974.
- MOKMA, D.L. & SIETZ, M.A. Effects of soil erosion on corn yield on Marlet Soils in south central Michigan. *J. Soil Water Cons.*, 47:325-327, 1992.
- MORENO, J.A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Seção de Geografia, 1961. 46p.
- NIZEYIMANA, E. & OLSON, K.R. Chemical, mineralogical and physical property differences between moderately and severely eroded Illinois Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1740-1748, 1988.
- OUSSIBLE, M.; CROOKSTON, R.K. & LARSON, W.E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.*, 84:34-38, 1992.
- PAGÈS, L. & PELLERIN, S. Evaluation of parameters describing the root system architecture of field grown maize plants (*Zea mays*, L.) II- Density, length, and branching of first-order lateral roots. *Plant Soil*, 164:169-176, 1994.
- ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSI FILHO, H. & MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *Bragantia*, 53:259-266, 1994.
- SAS Institute. SAS/STAT Procedures guide for personal computers. Version 6. Cary, NC, 1990. 705p.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:191-199, 2000.
- SWAN, J.B.; SHAFER, M.J. & PAULSON, W.H. Simulating the effect of soil depth and climatic factors on corn yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1025-1032, 1987.
- TAYLOR, H.M. & GARDNER, H.R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.*, 96:153-156, 1963.
- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.*, 63:995-1001, 1975.
- VEEN, B.W. & BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. *Soil Till. Res.*, 16:219-226, 1990.
- VYN, T.J. & RAIMBAULT, B.A. Long-term effect of five systems on corn response and soil structure. *Agron. J.*, 85:1074-1079, 1993.
- WILLIAMS, J.R.; ALLMARAS, R.R.; RENARD, K.G.; LYLES, L.; MOLDENHAUER, W.C.; LANGSDALE, G.W.; MEYER, L.P. & RAWLS, W.J. Soil erosion effects on soil productivity: A research perspective. *J. Soil Water Cons.*, 36:82-90, 1981.

