



XXXI
CONGRESSO
BRASILEIRO
DE CIÊNCIA
DO SOLO

CONQUISTAS
& DESAFIOS
da Ciência do
Solo brasileira



De 05 a 10 de agosto de 2007 Serrano Centro de Convenções - Gramado-RS

Utilização de Modelo Mecanístico na Predição da Absorção de Fósforo em Função de Alteração de Parâmetros de Planta e de Solo em Plantio Direto

ALAERTO LUIZ MARCOLAN⁽¹⁾ & IBANOR ANGHINONI⁽²⁾

RESUMO – Para melhor entendimento do processo de suprimento de nutrientes pelo solo e de sua absorção pelas plantas, foram desenvolvidos modelos mecanísticos que possibilitam prever os efeitos dos fatores de solo e de planta envolvidos. Os modelos calculam a absorção de nutrientes pela integração de parâmetros de solo e de planta, por meio de fluxo de massa e difusão, com as propriedades morfológicas do sistema radicular e sua taxa de crescimento, e com os parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes. O presente estudo foi realizado com os objetivos de verificar se o modelo mecanístico de Barber & Cushman estima satisfatoriamente a absorção de fósforo por plantas de soja crescendo em solos do Rio Grande do Sul com diferentes características difusivas e sistemas de preparo do solo e, uma vez validado o modelo, utilizá-lo para identificar a importância relativa de parâmetros de solo e de planta associados ao suprimento e à absorção de P pelas plantas. O experimento foi realizado em câmara de crescimento do Departamento de Solos da UFRGS, em colunas indeformadas de solos. Foram determinados os parâmetros de solo e de planta necessários para atender os objetivos propostos. O modelo mecanístico de Barber & Cushman [1], embora a subestimação encontrada em sua validação neste trabalho, mostra-se satisfatório para descrever a absorção de P pelas plantas de soja crescendo em solos com diferentes características difusivas e submetidos a diferentes sistemas de preparo. As simulações com parâmetros de solo e de planta demonstram a importância da manutenção do conteúdo volumétrico de água e da concentração de P na solução do solo em níveis adequados e de um sistema radicular das plantas bem desenvolvido para possibilitar um adequado suprimento e absorção de P pelas plantas. Aumentos no conteúdo volumétrico de água, na concentração de P na solução do solo e no crescimento radicular resultam em aumento no suprimento e na absorção de P pelas plantas; já, reduções nesses parâmetros se refletem em diminuição na absorção desse nutriente.

Introdução

Para melhor entendimento do processo de suprimento de nutrientes pelo solo e de sua absorção pelas plantas, foram desenvolvidos modelos mecanísticos que possibilitam verificar ou prever os efeitos dos fatores de solo e de planta envolvidos. Esses modelos representam um resumo do

conhecimento do fluxo do nutriente no sistema solo-planta, enfatizando os mecanismos e os fatores envolvidos na sua absorção pelas plantas, porém, sua utilização é, ainda, pouco frequente. Mudar essa concepção poderia contribuir para o desenvolvimento de métodos mais eficientes na avaliação da disponibilidade de fósforo (P) para as plantas e, assim, no manejo da adubação fosfatada, melhorando a sua eficiência.

Um programa de computador foi desenvolvido visando incorporar parâmetros necessários ao cálculo de absorção de nutrientes [1]. O modelo matemático calcula a absorção de nutrientes pela integração de onze parâmetros de solo e de planta, relacionados com o suprimento de nutrientes pelo solo às raízes, por meio de fluxo de massa e difusão, com as propriedades morfológicas do sistema radicular e sua taxa de crescimento, e com os parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes [2].

O modelo de Barber & Cushman [1] tem sido utilizado para simulação de absorção de nutrientes, e prediz satisfatoriamente a absorção de nutrientes em solos [1]. Para a sua validação, a absorção predita é comparada com a absorção efetiva das plantas. Depois de validados, possibilitam prever as consequências na absorção de fósforo, devido a alterações nos seus parâmetros pela variação de fatores de solo e de planta. Estas variações são efetuadas pelo uso de simulações, que podem ser análises de sensibilidade, geralmente utilizadas para identificar a magnitude da contribuição de cada parâmetro na absorção do nutriente, ou para investigar o efeito de alterações nos parâmetros de solo e de planta, pela variação de fatores, bióticos e abióticos, que permitem, por exemplo, simular o efeito de manejo do solo e da adubação, na absorção dos nutrientes.

O presente estudo foi realizado com os objetivos de (a) verificar se o modelo mecanístico de Barber & Cushman [1] estima satisfatoriamente a absorção de fósforo por plantas de soja crescendo em solos do Rio Grande do Sul (RS) com diferentes características difusivas e sistemas de preparo do solo e, (b) uma vez validado o modelo, utilizá-lo para identificar a importância relativa de parâmetros de solo e de planta associados ao suprimento e à absorção de P pelas plantas.

Palavras-Chave: soja, difusão, sistema de preparo.

Material e Métodos

Experimentos cultivados por vários anos em diferentes tipos de solos e sistemas de preparo foram selecionados de maneira que, em cada experimento, as

⁽¹⁾ Pesquisador Embrapa Rondônia, BR 364 Km 5,5, Caixa Postal 406, CEP 78900-970, Porto Velho (RO). E-mail: marcolan@cpafro.embrapa.br.

⁽²⁾ Professor Colaborador do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 7712. CEP 91540-000, Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: ibanghi@ufrgs.br

quantidades de P adicionadas por meio das adubações fossem as mesmas nos dois sistemas. As características principais das áreas experimentais estão descritas abaixo.

Histórico dos experimentos - O experimento 1 foi instalado em 1988, na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Eldorado do Sul, RS, em Argissolo Vermelho distrófico, teor de argila de 220 g kg⁻¹. As amostras de solo foram coletadas nas parcelas com sistema plantio direto (SPD) e preparo convencional (PC), e adubação a lanço, durante 17 anos, onde cultivada aveia + ervilhaca, no inverno, e milho, no verão.

O experimento 2 foi instalado em 1994, na Estação Experimental do Arroz do Instituto Rio Grandense do Arroz, em Cachoeirinha, RS, em Gleissolo Háplico TA distrófico, teor de argila de 320 g kg⁻¹. As amostras de solo foram coletadas nas parcelas com SPD e PC durante 10 anos, com azevém, no inverno, e arroz irrigado por alagamento, no verão.

O experimento 3 foi instalado em 1979, no Centro de Atividades Agrícolas e Florestais da Cooperativa Triticola de Santo Ângelo, RS, em Latossolo Vermelho distrófico, teor de argila de 680 g kg⁻¹. As amostras foram coletadas nas parcelas com a adição de nitrogênio no SPD e PC, com diferentes sucessões culturais, trigo/soja e aveia/milho, entre as safras de 1986/87 e 1998/99. A sucessão trigo/soja foi cultivada de 1979 até 1999. Já, na sucessão aveia/milho cultivou-se trigo/soja de 1979 até a safra de 1985/86 e aveia/milho de 1986 até 1999. De 1999 até 2005, independentemente da sucessão, cultivou-se, trigo/soja, trigo/milho, aveia/soja, nabo/milho, trigo/soja e nabo/soja, respectivamente. Assim, para diferenciar os sistemas de cultivos, o solo da sucessão trigo-soja será chamado de Latossolo Vermelho distroférrico 1 e o solo da sucessão aveia-milho de Latossolo Vermelho distroférrico 2.

Amostragem do solo - A amostragem de solo para sua caracterização foi feita nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, coletando-se amostras em colunas indeformadas de solo (5x10 cm), para a determinação do P na solução do solo, e amostras de solo, para as determinações químicas. Foram também coletadas amostras indeformadas de solo em colunas de PVC (9,6 x 20 cm), para o cultivo de soja em câmara de crescimento.

Cultivo de soja - O experimento foi realizado em câmara de crescimento na UFRGS. Constou de oito tratamentos, resultantes de três tipos de solos, um com duas sucessões de culturas, originando quatro tratamentos, e dois sistemas de preparo, PD e PC, com três repetições.

Sementes de soja foram germinadas em papel toalha, colocado em forma de cartucho em vaso contendo água destilada. Após oito dias, as plantas foram selecionadas, as raízes uniformizadas, e transferidas três plantas para cada coluna com solo. O

experimento foi concluído 20 dias após o transplante das plântulas. Determinaram-se os parâmetros de solo e de planta necessários à operacionalização do modelo de Barber & Cushman [1].

Parâmetros de solo - Determinaram-se a concentração de P na solução do solo (C_{li}) e P extraível do solo (C_s), pelo método da resina de troca aniônica em membranas. O poder tampão de P no solo (b) foi calculado por $b = C_s / C_{li}$. O coeficiente de difusão efetiva (D_e) foi obtido por $D_e = D_1 \theta f / b$ [3], em que, D₁ é o coeficiente de difusão do P em água (8,9 x 10⁻⁶ cm² s⁻¹); θ é o conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo; f é o fator de impedância, calculado por $f = 1,58 \theta - 0,172$ (solos francos e arenosos) e $f = 0,99 \theta - 0,172$ (solos argilosos) [4].

Parâmetros morfológicos do sistema radicular - As plantas de soja foram cortadas rente ao solo 20 dias após o transplante e as raízes separadas do solo em duas camadas, 0-10 e 10-20 cm. A massa de matéria úmida foi obtida por pesagem e o volume calculado admitindo-se que as raízes úmidas têm densidade igual a 1 g cm⁻³. O comprimento radicular foi determinado pelo método de Tennant [5]. A taxa de crescimento, o raio médio, a meia distância entre raízes e a área superficial foram calculados conforme descrito em Halmark & Barber [6] e em Barber [2].

Absorção de água e de P e massa de matéria seca - O influxo de água na superfície da raiz foi calculado pela equação $v_0 = \{ \ln (AS_2 / AS_1) / (AS_2 - AS_1) \} \times (A_2 - A_1) / (t_2 - t_1)$, em que, AS₁ e AS₂ são as áreas superficiais de raízes e A₁ e A₂ a água consumida até os tempos t₁ e t₂, respectivamente. Na parte aérea e nas raízes da soja, determinaram-se a massa de matéria seca e o teor de P no tecido por digestão úmida.

Parâmetros cinéticos de absorção - Para a determinação dos parâmetros cinéticos de absorção (I_{máx}, K_m e C_{min}) foi conduzido, nas mesmas condições do experimento em solos, um experimento em solução nutritiva. Os parâmetros foram determinados 20 dias após a transferência das plantas para os vasos de acordo com o procedimento de exaustão de P da solução de Claassen & Barber [7]. O influxo máximo de P (I_{máx}) e o valor da constante de Michaelis-Menten (K_m) foram calculados pela aproximação gráfico-matemática descrita por Ruiz [8].

Verificação do modelo de Barber-Cushman - A verificação foi efetuada em computador suprindo-se o programa com parâmetros de solo e planta para a predição da absorção de P nos diferentes sistemas de preparo do solo. Esta predição foi comparada com absorção efetiva das plantas para a validação do modelo.

Simulações com o modelo utilizado - Uma vez validado o modelo, efetuou-se simulações para identificar a importância relativa de parâmetros de solo e de planta associados à liberação, ao suprimento e à absorção do P. As variações foram de 0,50 a 2,0 vezes o valor de cada parâmetro, mantendo-se os demais constantes.

Resultados e Discussão

Para a validação do modelo, foram utilizados os valores dos parâmetros de solo e morfológicos das raízes de cada repetição do cultivo com soja, nos diferentes solos e sistemas de cultivo, e os valores médios dos parâmetros cinéticos de absorção no cultivo em solução nutritiva.

Na comparação entre o P absorvido pelas plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman [1], a análise de correlação indicou que o valor do coeficiente de correlação (r) foi de 0,90, o que pode ser considerado muito satisfatório ($r^2 = 0,81$) (Figura. 1). Entretanto, apesar da intercepção (valor a da equação de regressão) estar próxima da origem dos eixos, houve uma subestimação de 27% na predição das quantidades de P absorvido pela soja ($b = 0,73$).

A subestimação ocorrida poderia ser atribuída à contribuição dos pêlos radiculares e presença de micorriza; entretanto, espera-se pouca contribuição dos mesmos para a absorção de P em solos bem supridos com esse nutriente, e em condições de umidade adequada. Os solos estudados apresentaram teor de P acima do teor de suficiência e o cultivo ocorreu com o solo mantido em capacidade de campo.

Embora a subestimação ocorrida, o modelo pode ser utilizado para simular a absorção de P pelas plantas de soja, em solos com diferentes características difusivas.

Simulações - Os valores iniciais dos parâmetros de solo e de planta usados nas simulações, correspondem a razão de variação igual a 1 (Tabela 1), os quais foram obtidos experimentalmente no Latossolo Vermelho distroférrico 1, cultivado no SPD, na camada de 0-20 cm. Este solo foi escolhido por apresentar absorção de P predita pelo modelo ($92 \mu\text{mol vaso}^{-1}$) próxima da obtida experimentalmente ($110 \mu\text{mol vaso}^{-1}$), além de representativo das lavouras de soja do Estado do RS.

1ª Simulação: Absorção de P por plantas de soja em função do conteúdo volumétrico de água do solo (θ) - Em cultivos no campo ocorrem períodos de estiagem e períodos com precipitações excessivas. Variações no conteúdo volumétrico de água implicam em mudanças no fator de impedância, que, juntamente com ele, atuam no coeficiente de difusão do P (D_e), e, assim, no suprimento de P às raízes das plantas. Na presente simulação, os valores do coeficiente de difusão de P (D_e) foram recalculados em função da variação do conteúdo volumétrico de água no solo (θ) e dos novos valores do fator de impedância (f).

Observa-se (Figura 2) que, com o conteúdo volumétrico de água inicial ($\theta = 0,41$), as plantas absorveriam $94 \mu\text{mol}$ de P por vaso e que, com a redução do conteúdo volumétrico de água, esta absorção diminui. Assim, com um conteúdo volumétrico de água igual a $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a absorção de P pelas plantas diminui para $76 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, valor este 19% menor em relação ao inicial (Figura 2). Já, com o

aumento da umidade haveria um aumento na absorção de P até atingir um máximo, em torno de $0,60 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Fig. 2), que é aproximadamente o valor da porosidade total deste solo.

A variação do conteúdo volumétrico de água mostrou a sua importância na absorção de P pelas plantas de soja e que, quando em baixo conteúdo volumétrico de água no solo, as plantas terão baixa absorção de P. A redução do conteúdo volumétrico de água do solo, afeta a difusão de P até a superfície radicular e, também, o crescimento do sistema radicular, diminuindo a área ativa de absorção de P [2].

2ª Simulação: Absorção de P por plantas de soja em função da concentração inicial de P na solução do solo (C_{ii}) - No SPD, ocorre aumento da disponibilidade de P, em relação ao PC. Entretanto, são poucos os estudos que analisam as conseqüências advindas das mudanças dos parâmetros que afetam o suprimento de P às raízes na absorção total de P pelas plantas. Assim, variou-se a concentração inicial de P na solução do solo pressupondo-se os demais parâmetros fixos. A concentração inicial de P na solução do solo foi recalculada para cada razão de variação.

O aumento da concentração de P na solução do solo determinaria um aumento na absorção de P pelas plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman [1], sendo que, mesmo na maior concentração de P, $1,94 \mu\text{mol L}^{-1}$, a taxa máxima de absorção ($I_{\text{máx}}$) ainda não foi atingida (Tabela 1). O valor predito pelo modelo para essa concentração foi de $190 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, sendo proporcionalmente maior que o valor de $94 \mu\text{mol vaso}^{-1}$ absorvido com a concentração de P na solução de $0,97 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 3).

Observa-se, também, que pequenas variações na concentração de P na solução do solo teriam significativo efeito na absorção pela planta. Por exemplo, se a concentração de P na solução fosse reduzida em 20%, passando de $0,97$ (valor inicial) para $0,78 \mu\text{mol L}^{-1}$, a absorção de P pelas plantas diminuiria de 94 para $70 \mu\text{mol L}^{-1}$, uma redução de 26%. Com a diminuição do P na solução do solo ocorre um decréscimo no coeficiente de difusão do P e no gradiente de concentração, com conseqüente diminuição do suprimento e da absorção de P pelas plantas.

3ª Simulação: Absorção de P por plantas de soja em função do crescimento radicular (L) - No SPD o P é aplicado na camada superficial do solo diminuindo a superfície de contato com os constituintes do solo e aumentando a sua disponibilidade, favorecendo o crescimento e a área superficial de raiz. Sabendo da importância do sistema radicular para a absorção do P, variou-se o crescimento radicular (L). Os valores do influxo médio de água (v_0), da meia distância entre raízes e da taxa de crescimento de raiz foram recalculados em função das razões de variação.

A relação entre o crescimento de raiz e a absorção de P demonstra que, com o aumento do crescimento de raiz,

ocorre um aumento linear na absorção de P pelas plantas de soja (Figura 4). Este resultado ratifica a importância do sistema radicular para o suprimento e absorção de P pelas plantas. Quando o crescimento de raiz aumenta, ocorre um aumento na taxa de crescimento de raiz (k) e, não havendo competição entre raízes, o volume de solo explorado aumenta, refletindo-se diretamente no aumento de absorção de P pelas plantas.

Considerando que, em dada situação adversa, ocorra uma restrição ao crescimento de raiz de 20%, o comprimento de raiz de 110 m (valor inicial) diminuiria para 88 m e a absorção de P de $95 \mu\text{mol vaso}^{-1}$ diminuiria para $79 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, uma redução de 17% na absorção de P (Fig. 4). Entretanto, melhorias das condições do solo, com incremento de 20% no crescimento de raiz, este passaria de 110 m para 132 m e a absorção de P de $95 \mu\text{mol vaso}^{-1}$ para $111 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, um aumento de 17% (Figura 4). Mudanças no crescimento de raiz se refletem na absorção de P, mostrando que fatores limitantes ao crescimento de raízes podem causar prejuízos para as plantas em razão da importância do sistema radicular para a absorção do P.

Conclusões

Embora a subestimação encontrada em sua validação neste trabalho, o modelo mecanístico de Barber & Cushman [1] mostra-se satisfatório para descrever a absorção de P pelas plantas de soja crescendo em solos com diferentes características difusivas e submetidos a diferentes sistemas de preparo. As simulações com parâmetros de solo e de planta demonstram a importância da manutenção do

conteúdo volumétrico de água e da concentração de P na solução do solo em níveis adequados e de um sistema radicular das plantas bem desenvolvido para possibilitar um adequado suprimento e absorção de P pelas plantas. Aumentos no conteúdo volumétrico de água, na concentração de P na solução do solo e no crescimento radicular resultam em aumento no suprimento e na absorção de P pelas plantas; já, reduções nesses parâmetros se refletem em diminuição na absorção desse nutriente.

Referências Bibliográficas

- [1] BARBER, S.A.; CUSHMAN, J.H. Nitrogen uptake model for agronomic crops. In: ISKANDAR, I.K. (Ed.) **Modeling waste water renovation-land treatment**. New York: John Wiley Interscience, 1981. p.382-409.
- [2] BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2.ed. New York. John Wiley & Sons, 1995. 414p.
- [3] NYE, P.H.; TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1977. 342p.
- [4] BARRACLOUGH, P.B.; TINKER, P.B. The determination of ionic diffusion coefficients in field soils. I. Diffusion coefficients in sieved soils in relation to water content and bulk density. **Journal of Soil Science**, .32:225-236, 1981.
- [5] TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, 63:995-1001, 1975.
- [6] HALMARK, W.B.; BARBER, S.A. Root growth and morphology, nutrient uptake, and nutrient status of soybeans as affected by soil K and bulk density. **Agronomy Journal**, 73:779-782, 1981.
- [7] CLAASSEN, N.; BARBER, S.A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, 54:564-568, 1974.
- [8] RUIZ, H.A. Estimativa dos parâmetros cinéticos K_m e $V_{m\max}$ por uma aproximação gráfico-matemática. **Revista Ceres**, 32:79-84, 1985.

Tabela 1. Valores dos parâmetros de solo e de planta obtidos experimentalmente em Latossolo Vermelho distroférrico 1 cultivado com soja no sistema plantio direto, utilizados como referência nas simulações

Parâmetros do modelo	Valor inicial
Coefficiente de difusão efetiva (D_e)	$1,03E-09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Poder tampão (b)	831
Concentração inicial de P em solução (C_i)	$0,968 \mu\text{mol L}^{-1}$
Influxo médio de água V_0	$1,81E-06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Meia distância entre raízes (r_1)	0,205 cm
Raio médio da raiz (r_0)	0,011 cm
Comprimento inicial de raiz (L_0)	20 cm
Taxa de crescimento de raiz (k)	$5,19E-06 \text{ cm s}^{-1}$
Influxo máximo ($I_{m\max}$)	$2,00E-07 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Constante de Michaelis-Menten (K_m)	$1,14 \mu\text{mol L}^{-1}$
Concentração mínima ($C_{m\min}$)	$0,29 \mu\text{mol L}^{-1}$
Tempo de crescimento de raízes (t)	1789200 s

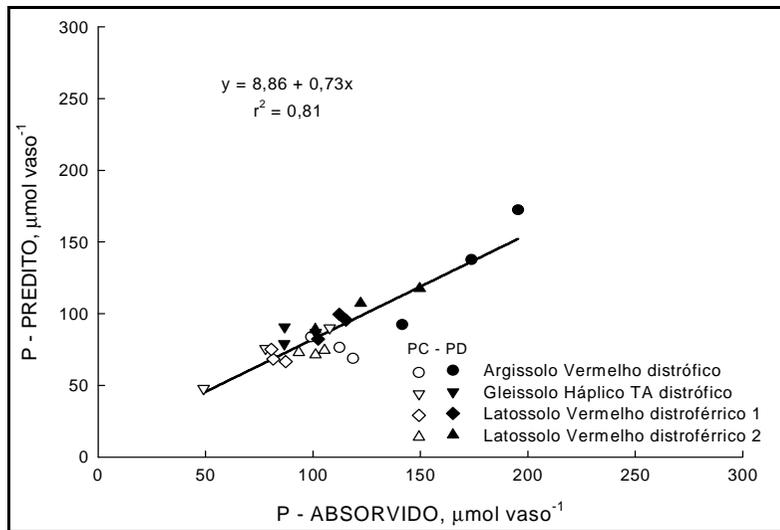


Figura 1. Relação entre fósforo absorvido por plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman [1] em solos cultivados em diferentes sistemas de preparo.

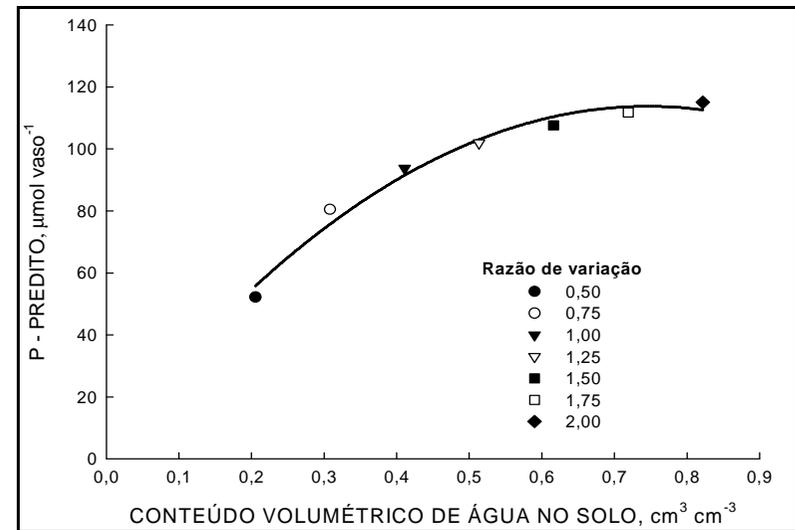


Figura 2 Relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman [1] no Latossolo Vermelho distrófico 1 cultivado no sistema plantio direto.

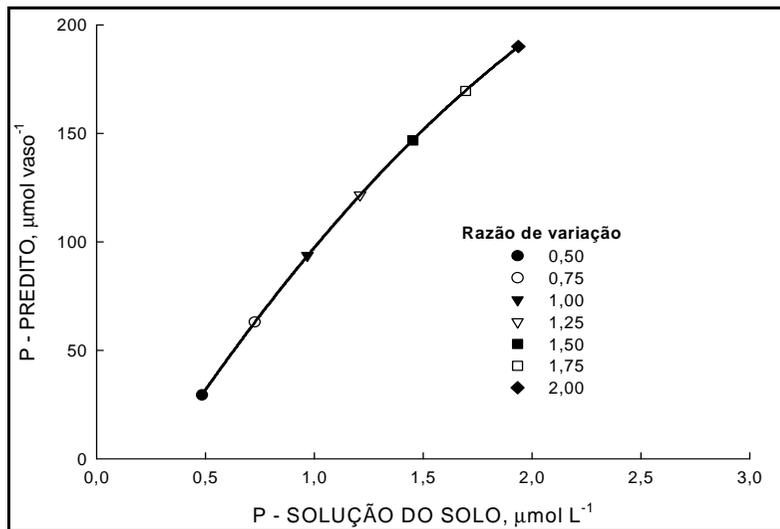


Figura 3. Relação entre a concentração inicial de fósforo na solução do solo e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman [1] no Latossolo Vermelho distrófico 1 cultivado no sistema plantio direto.

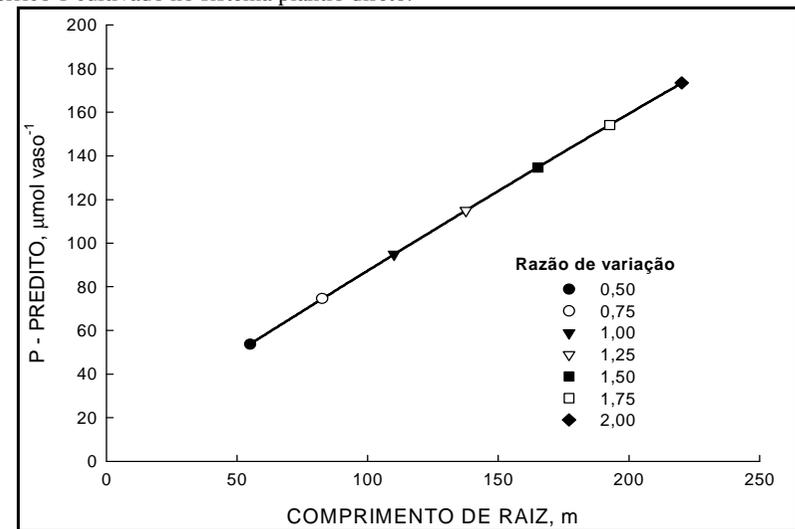


Figura 4. Relação entre o crescimento de raiz e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman [1] no Latossolo Vermelho distrófico 1 cultivado no sistema plantio direto.