

INTERVALO ÓTIMO DE POTENCIAL DA ÁGUA NO SOLO: UM CONCEITO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E MANEJO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA

Cássio Antônio Tormena¹, Álvaro Pires da Silva², Antônio Carlos Andrade Gonçalves²
& Marcos Vinícius Folegatti³

RESUMO

O manejo de irrigação tem sido estabelecido considerando-se apenas o potencial da água no solo, como fator limitante para o crescimento das plantas. O conteúdo de água do solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, foi definido como água disponível para as plantas; entretanto, a resistência à penetração e a aeração do solo também podem limitar o crescimento de plantas, mesmo com o potencial da água no solo estando dentro do intervalo correspondente à água disponível. O Intervalo Ótimo do Potencial da Água no Solo (IOP) é um conceito que incorpora os potenciais da água do solo associados à água disponível e, também, os potenciais da água do solo, nos quais há uma limitação para o crescimento de plantas associada a resistência à penetração e à aeração do solo. O objetivo deste trabalho foi caracterizar o IOP em um Latossolo Roxo argiloso, em Guaíra, SP, irrigado com um sistema de pivô de central. O IOP foi determinado usando-se a curva de retenção de água e a curva de resistência do solo à penetração, as quais foram obtidas a partir de oitenta e oito amostras indeformadas. O IOP variou de 0 a 1,49 MPa e foi negativamente correlacionado à densidade do solo (Ds). Para $D_s > 1,09 \text{ Mg m}^{-3}$, a resistência à penetração foi o limite superior do IOP, enquanto a aeração do solo definiu o limite superior para $D_b > 1,28 \text{ Mg m}^{-3}$. Os limites de potencial correspondentes à água disponível foram iguais ao IOP, mas somente para $D_b < 1,09 \text{ Mg m}^{-3}$.

Palavras-chave: água disponível, densidade global, manejo de irrigação, qualidade física do solo

LEAST LIMITING POTENTIAL RANGE: A CONCEPT TO EVALUATE THE SOIL PHYSICAL QUALITY AND WATER MANAGEMENT IN IRRIGATED CROPS

ABSTRACT

Irrigation management has been established taking into account only soil water potential as the limiting factor for plant growth. The range in soil water content between field capacity and permanent wilting point has been defined as plant available water. However, the soil resistance to root penetration and the soil aeration may also limit crop growth inside the range corresponding to plant available water. The least limiting potential range (LLPR) is a concept that incorporates soil water potentials used to define plant available water as well as soil water potentials in which there is a limitation to crop growth associated to soil resistance to penetration and to soil aeration. The objective of this study was to characterize the LLPR for a Typic Hapludox irrigated by a center pivot system at Guaira-SP, Brazil. The LLPR was determined using the soil water retention curve and the soil resistance curve which were obtained using eighty eight undisturbed cores. The LLPR ranged from 0 to 1.49 MPa and

¹ Professor do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá. Av. Colombo 5790, CEP 87020 - 900, Maringá, PR. E-mail: catormen@cca.uem.br

² Professores do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq

³ Professor do Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq

it was negatively related to bulk density (D_b). For $D_b > 1.09 \text{ Mg m}^{-3}$, the soil resistance was the LLPR upper limit whereas soil aeration defined the LLWP lower limit for $D_b > 1.28 \text{ Mg m}^{-3}$. Available water was equal to LLPR only at $D_b > 1.09 \text{ Mg m}^{-3}$.

Key words: available water, bulk density, irrigation management, soil physical quality

INTRODUÇÃO

O manejo da irrigação de uma cultura deve ser feito com base em critérios que possibilitem a aplicação de água no solo, de forma a promover produção ótima, do ponto de vista econômico. A irrigação deve repor, ao solo, a quantidade de água retirada pela cultura e o momento de se irrigar é aquele no qual a disponibilidade de água no solo assume valor mínimo, abaixo do qual a planta começa a sentir os efeitos da restrição de água. A definição de quando irrigar pode ser feita por métodos que estabeleçam valores limites para variáveis de solo ou de planta (Hoffman et al., 1990; Steele et al., 1997).

O solo constitui um reservatório ao qual se repõe, periodicamente, a água retirada pela cultura, respeitando-se um valor limite inferior para a disponibilidade de água. Apesar de ser bastante criticado (Ritchie, 1981) o conceito de água disponível (AD) entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), ($AD = CC - PMP$) é amplamente utilizado neste contexto.

Numa abordagem quantitativa procura-se estabelecer, para fins de projeto e manejo de irrigação, um percentual (p) da disponibilidade total de água no solo que poderia ser usado pela cultura (Doorenbos & Pruitt, 1977). O valor p é função da cultura e do nível de evapotranspiração local (Denmead & Shaw, 1962). Este conceito é útil para a definição do momento de se irrigar no método do balanço de água, sendo importante monitorar a umidade do solo (Steele et al., 1997). Vários métodos podem ser utilizados para definir o momento de se proceder à irrigação (Kramer & Boyer, 1995) e o de mais fácil utilização é por meio do controle do potencial da água no solo (Taylor, 1965; Campbell, 1988; Hendrickx & Wierenga, 1988). Os tensiômetros são bastante utilizados para este fim e indicam quando as plantas devem ser irrigadas com base em um potencial limite, considerando-se apenas o potencial da água no solo como fator de restrição ao crescimento das plantas.

Os critérios de irrigação têm sido estabelecidos considerando-se a resposta da cultura ao fator água; no entanto, não havendo limitações térmicas, além do potencial da água no solo, a resistência à penetração e a difusão de oxigênio no solo também afetam o crescimento das plantas (Letey, 1985). Desta forma e dependendo da textura e da estrutura do solo, limitações ao crescimento das plantas, por reduzida aeração ou elevada resistência à penetração, podem ocorrer dentro da faixa de AD (Topp et al., 1994). Num solo com estrutura degradada, a taxa de difusão de oxigênio pode limitar o crescimento radicular em potenciais correspondentes à umidade do solo igual ou acima da capacidade de campo, enquanto a excessiva resistência à penetração pode limitar o crescimento radicular, sob condições mais úmidas que o ponto de murcha.

O "Least Limiting Water Range" (LLWR) é o conceito de um único parâmetro que incorpora, numa faixa de conteúdo de água, as limitações ao crescimento das plantas por aeração, água

disponível e resistência do solo à penetração das raízes (Silva et al., 1994). Este conceito foi introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998) utilizando o termo Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) como tradução do LLWR.

O potencial da água no solo está mais diretamente ligado ao crescimento das plantas que o conteúdo de água disponível (Jensen et al., 1998). Acevedo et al. (1971) verificaram que o crescimento de folhas de milho foi drasticamente reduzido, com pequenas modificações no potencial da água no solo. Desta forma, torna-se conveniente expressar o conceito do IHO em termos de potencial matricial. É possível se expressar o IHO utilizando-se o potencial, ao invés da umidade (Boone et al., 1986, 1987; Boone, 1988; Boone & Veen, 1994). Neste trabalho, foi adotado o termo "Intervalo Ótimo de Potencial da Água no Solo (IOP)" para expressar o IHO em termos de potencial matricial. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi quantificar o IOP num Latossolo Roxo e demonstrar o seu potencial no manejo do solo e da água na agricultura irrigada.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado numa área agrícola comercial situada no município de Guaíra, região nordeste do Estado de São Paulo, situado nas coordenadas $20^\circ 19'$ de latitude sul e $48^\circ 18'$ de longitude oeste. O clima da região caracteriza-se por apresentar temperatura média de $22,7^\circ\text{C}$, precipitação média de 1420 mm entre outubro e abril e um período seco, com precipitações de menos de 220 mm, entre maio e setembro (Saad, 1987).

Neste estudo foram utilizadas amostras de um Latossolo Roxo, cuja análise granulométrica revelou valores médios de 800 g kg^{-1} de argila, 150 g kg^{-1} de silte e 50 g kg^{-1} de areia. A amostragem foi realizada num talhão cultivado com milho, no sistema de plantio direto, e irrigado por um sistema de irrigação por aspersão tipo pivô-central. A rotação de culturas utilizada consistia da cultura de soja no verão, como cultura principal; milho no inverno, como cultura "safrinha" e, na seqüência, a cultura do feijão. A amostragem foi feita na primeira quinzena de agosto de 1996 e, neste período, a área estava sendo cultivada com milho (*Zea mays* L.) c.v. Cargill 701. A adubação de base da cultura de milho foi com 330 kg ha^{-1} de um fertilizante comercial 04-20-20 + Zn. As adubações em cobertura da cultura do milho corresponderam a 145 kg ha^{-1} do fertilizante comercial 20-00-20, aplicado 20 dias após a germinação (DAG) das plantas e 70 e 40 kg ha^{-1} de uréia aplicados aos 35 e 50 DAG. O controle de ervas daninhas foi feito por meio de métodos químicos convencionais.

A amostragem foi realizada na fase de maturação da cultura do milho; foram retiradas amostras com estrutura indeformada do centro da camada de 2,5-7,5 cm de profundidade, para as determinações físicas necessárias. Os pontos de amostragem foram localizados numa transeção transversal às linhas das culturas, seqüencialmente nas posições linha (L) e entrelinha (EL) da cultura, totalizando 88 amostras. As amostras foram

aconditionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de $\pm 5^\circ\text{C}$, até serem processadas.

Após devidamente preparadas, as amostras foram saturadas elevando-se gradualmente uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra. Para a determinação da curva de retenção adotou-se o procedimento descrito em Silva et al. (1994). As amostras foram divididas em 11 grupos de 8, sendo 4 por posição de amostragem: 4 amostras na linha e 4 amostras na entrelinha. Em cada grupo de amostras foram aplicados os seguintes potenciais: 0,003, 0,004, 0,006 e 0,008 MPa numa mesa de tensão adaptada de Topp & Zebchuk (1979) e os potenciais de 0,01, 0,03, 0,05, 0,07, 0,1, 0,5 e 1,5 MPa, por meio de pressões aplicadas em placas porosas, conforme Klute (1986). Após atingir o equilíbrio, as amostras foram utilizadas para determinar a resistência a penetração, conforme Tormena et al. (1998) e, em seguida, secas em estufa a 105 - 110 $^\circ\text{C}$, para determinação do conteúdo de água e da densidade do solo (Blake & Hartge, 1986).

Para a determinação do IOP é necessário o conhecimento das curvas de retenção de água e de resistência do solo a penetração. A relação funcional entre potencial matricial (ψ), expresso em módulo, e conteúdo volumétrico de água (θ), foi ajustada segundo procedimento descrito por Silva et al. (1994) sendo adotado o modelo:

$$\psi = a \theta^b \quad (1)$$

com a transformação logarítmica,

$$\ln(\psi) = \ln(a) + b \ln(\theta) \quad (2)$$

Utilizando-se a abordagem descrita em Silva et al. (1994) para incorporação da variação da densidade e da posição de amostragem (variável qualitativa: 0 = linha e 1 = entrelinha) a equação 2 pode ser reescrita como:

$$\ln(\psi) = \ln(a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2) + (b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2) \ln(\theta) \quad (3)$$

onde x_1 , x_2 e x_1x_2 são, respectivamente, densidade do solo, posição de amostragem e interação entre as duas variáveis, e a_i , b_i os coeficientes lineares determinados por regressão linear.

A resistência do solo (RP) é influenciada pela densidade (Ds) e pelo conteúdo de água do solo (θ) ou pelo potencial matricial (ψ). Isto implica numa relação funcional entre RP, Ds e ψ que pode ser identificada como curva de resistência do solo (CRS). A descrição da CRS foi feita por meio de um modelo não linear proposto por Busscher (1990) utilizando o potencial matricial (em módulo) ao invés da umidade como variável independente no modelo.

$$\text{RP} = c \psi^d \text{Ds}^e \quad (4)$$

que com a transformação logarítmica fica:

$$\ln(\text{RP}) = \ln(c) + d \ln(\psi) + e \ln(\text{Ds}) \quad (5)$$

De forma semelhante à curva de retenção, o efeito da posição de amostragem foi incorporado nos parâmetros do modelo, resultando a Eq. 6:

$$\ln(\text{RP}) = \ln(c_0 + c_1x_1) + (d_0 + d_1x_1) \times \ln(\psi) + (e_0 + e_1x_1) \ln(\text{Ds}) \quad (6)$$

O ajuste dos modelos de resistência e de retenção de água foi feito utilizando-se métodos de regressão linear, por meio da rotina PROC REG (SAS, 1991).

O IOP foi determinado utilizando-se o procedimento descrito por Silva et al. (1994). Um valor do IOP foi calculado para cada amostra, onde o valor da densidade do solo é conhecido. Para o solo estudado, os valores críticos para o crescimento das culturas, associados ao potencial matricial, à resistência do solo e porosidade de aeração foram, respectivamente, a capacidade de campo (CC) ou o potencial de 0,008 MPa (Libardi & Saad, 1994; Marciano et al., 1998), o ponto de murcha permanente (PMP) ou o potencial de 1,5 MPa (Savage et al., 1996), a resistência do solo à penetração (RP) de 2,0 MPa (Taylor et al., 1966) e a porosidade de aeração (Par) de 10% (Meyer & Barrs, 1991). Os valores do potencial nos quais a resistência a penetração é de 2,0 MPa foram obtidos a partir do modelo de resistência ajustado aos dados. O conteúdo de água no qual a porosidade de aeração é de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ foi obtido por $[(1 - \text{Ds}/\text{Dp}) - 0,1]$ assumindo que $\text{Dp} = 2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ é a densidade média de partículas neste solo. Este conteúdo de água foi utilizado para se obter o respectivo valor de potencial matricial, utilizando-se a curva de retenção ajustada aos dados. O IOP foi calculado como a diferença entre os limites superior e inferior dos potenciais em que ocorrem os parâmetros físicos considerados. O limite inferior é o maior valor do ψ considerado na capacidade de campo ($\psi = 0,008 \text{ MPa}$) ou na porosidade de aeração de 10%, e o limite superior é o menor valor de ψ na resistência de 2,0 MPa ou no ponto de murcha permanente ($\psi = 1,5 \text{ MPa}$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva para variáveis físicas do solo é mostrada na Tabela 1, cujos resultados demonstram que a faixa de potencial matricial utilizada permitiu uma ampla variação de umidade, para a variabilidade natural obtida da densidade do solo. Esta sistemática possibilitou uma grande amplitude de valores de resistência a penetração, necessária para a modelagem da curva de resistência do solo; já a densidade do solo apresentou distribuição normal dos seus valores, pelo teste de Shapiro ($W=0,9884$; $P < W=0,9229$) em conformidade com os resultados publicados na literatura (Silva et al. 1997).

Tabela 1. Estatística descritiva para variáveis físicas do solo, medidas nas amostras indeformadas

Variável	Média	Desvio-Padrão	Mínimo	Máximo
Ds	1,15	0,06	0,95	1,32
θ	0,35	0,05	0,24	0,46
RP	1,49	0,89	0,32	4,68

N=88; Ds = densidade do solo (Mg m^{-3}); θ = conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); RP = resistência a penetração (MPa); CV = coeficiente de variação (%)

Não foi constatado efeito da posição de amostragem sobre a curva de resistência do solo ($p > 0,05$). O modelo ajustado (Equação 7) explicou 83% da variabilidade da resistência a penetração. A resistência variou positivamente com a densidade

do solo e com o potencial matricial, indicando que, com o secamento do solo, ocorre um aumento na resistência à penetração das raízes, corroborando com os resultados obtidos por Smith et al. (1997) e Stirzaker et al. (1997).

$$RP = 0,1592 \psi^{0,2086} D_s^{5,9924} \quad (7)$$

O potencial matricial em que a resistência à penetração atingiu 2,0 MPa foi calculado por meio da Eq. (7) sendo obtida a Eq. (8):

$$\psi = \left[2,0 / (0,1592 D_s^{5,9924}) \right]^{(1/0,2086)} \quad (8)$$

Desta forma, a partir da equação 8, com um valor conhecido da densidade do solo foi obtido, para cada amostra, o valor do potencial matricial, no qual a resistência atingiu o nível considerado impeditivo de 2,0 MPa, com base nas indicações da literatura (Taylor et al., 1966; Weaich et al., 1992).

O modelo ajustado aos dados de retenção de água no solo é mostrado na equação 9. O módulo do potencial aumenta com o decréscimo da umidade e com o aumento da densidade do solo; numa mesma umidade, o aumento do potencial com a densidade do solo deve-se à mudança na distribuição de tamanho de poros, aumentando a proporção de poros com menores diâmetros (Gupta et al., 1989).

$$\psi = e^{(-14,2939 + 7,4826 D_s)} \theta^{(-10,7742)} \quad (9)$$

Para este estudo, é necessário estimar-se o potencial matricial no qual a porosidade de aeração é igual a 10%. Estas estimativas podem ser obtidas a partir da Eq. 9.

Da mesma forma que para as estimativas de potencial para a resistência à penetração crítica, o potencial no qual ocorre uma porosidade de aeração de 10% foi estimado para cada amostra, cada qual com um valor conhecido da densidade do solo.

A variação do potencial matricial nos limites críticos considerados na capacidade de campo, na porosidade de aeração, no ponto de murcha permanente e resistência do solo à penetração das raízes para cada valor da densidade do solo, é apresentada na Figura 1. Os potenciais na capacidade de campo e ponto de murcha permanente foram mantidos nos valores de 0,008 e 1,5 MPa. O valor de 0,008 MPa foi adotado em outros estudos relacionados com a dinâmica da água, em solos similares presentes na região estudada (Marciano et al., 1998; Libardi & Saad, 1994).

Os resultados demonstraram que o potencial no qual a porosidade de aeração é de 10% e que a resistência à penetração atinge 2,0 MPa, é fortemente influenciado pela densidade do solo. Com o aumento da densidade do solo verifica-se aumento do potencial necessário para ocorrer a porosidade de aeração de 10%. Na $D_s = 1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ é necessário que o solo drene até a CC, para que os níveis de aeração sejam satisfatórios e, a partir desta densidade, são necessários potenciais maiores que a CC ($>0,008 \text{ MPa}$). Verificou-se que em 4,5% das amostras o potencial necessário para atingir 10% de poros com ar assumiu valores superiores àquele correspondente à CC. Estes resultados sugerem que, de forma geral, a aeração não foi limitante ao crescimento das plantas; no entanto, para

densidades superiores às obtidas neste trabalho, a aeração inadequada, mesmo não sendo constante, pode comprometer o desenvolvimento das plantas. Os resultados obtidos por Lizaso & Ritchie (1997) indicaram que, nestas condições, ocorreram perdas irrecuperáveis no crescimento de plantas de milho.

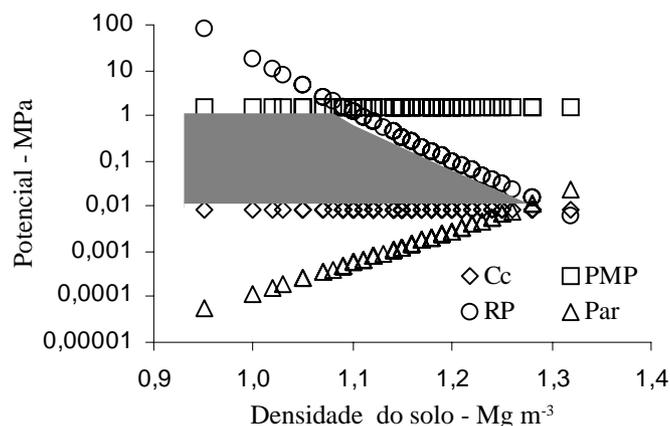


Figura 1. Variação do potencial matricial em função da densidade do solo nos limites críticos da capacidade de campo (CC, $\Psi = 0,008 \text{ MPa}$), do ponto de murcha permanente (PMP, $\Psi = 1,5 \text{ MPa}$), da porosidade de aeração (Par) e da resistência à penetração (RP). A área hachurada representa o IOP

Conforme pode ser constatado na Figura 1, o potencial em que se atinge a resistência crítica de 2,0 MPa diminuiu com o aumento da densidade do solo, ou seja, na medida em que este aumento ocorre, a resistência torna-se crítica sob umidades maiores. A RP passou a ser limitante em potenciais menores que o ponto de murcha para valores de D_s acima de $1,09 \text{ Mg m}^{-3}$. Na $D_s = 1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ a RP crítica ocorreu em potenciais menores do que aquele com 10% de porosidade de aeração. A partir da densidade de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, a estrutura do solo impõe restrições ao crescimento das plantas devido à reduzida difusão de O_2 no solo, bem como pelo impedimento mecânico ao crescimento radicular. A substituição do PMP pela RP, para valores de D_s acima de $1,09 \text{ Mg m}^{-3}$, indica que a resistência do solo à penetração controla o limite inferior de disponibilidade de água no solo, em 84% das amostras, como pode ser observado na Figura 2.

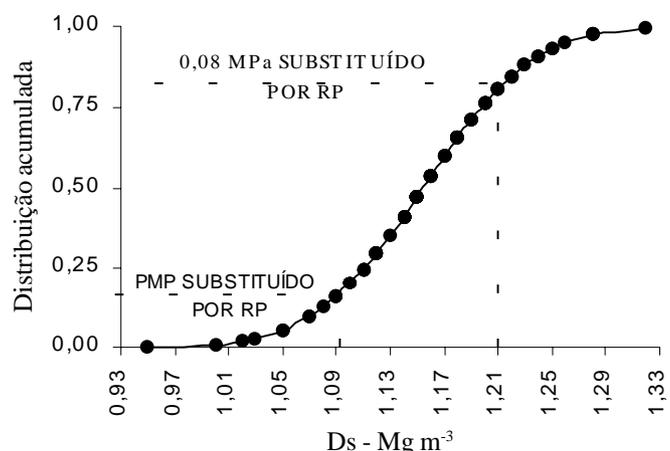


Figura 2. Distribuição normal acumulada dos valores de densidade do solo (D_s)

Esses resultados mostram que, na maior parte das amostras estudadas, a resistência à penetração atua como principal fator limitante ao crescimento das plantas dentro da faixa de valores de potencial da AD. A variação do IOP com a densidade do solo é apresentada na Figura 3. A amplitude de variação do IOP foi de 0 a 1,49 MPa, com valor médio de 0,51 MPa. O IOP permaneceu com o seu valor máximo para valores de densidade do solo de até 1,09 Mg m^{-3} , sendo drasticamente reduzido para valores de densidades superiores. Esta redução é determinada pela ocorrência de potenciais, menores que o referente ao PMP, nos quais a resistência à penetração torna-se limitante (Figura 1). A redução no valor do IOP corresponde a uma redução na amplitude da faixa de condições físicas do solo na qual as plantas podem crescer sem limitações. Em termos de manejo de solo e água, a manutenção da umidade dentro dos limites do IOP pode ser utilizada como estratégia de controle da qualidade física do solo para as plantas. Quanto mais estreito este intervalo, maior a dificuldade de se fazer o manejo da água com vistas à produção ótima, mesmo em presença de irrigação (Jawayardane & Chan, 1994).

O estabelecimento de condições físicas mais adequadas ao crescimento das plantas, com a ampliação do IOP, pode ser feito por meio de práticas de manejo que reduzem a densidade do solo (Jawayardane & Chan, 1994). Como pode ser constatado na Figura 3, o IOP é sensível às modificações na estrutura do solo e, assim, o manejo da água na agricultura irrigada não deve levar em conta apenas a faixa de água disponível mas, também, os outros fatores físicos do solo envolvidos no IOP.

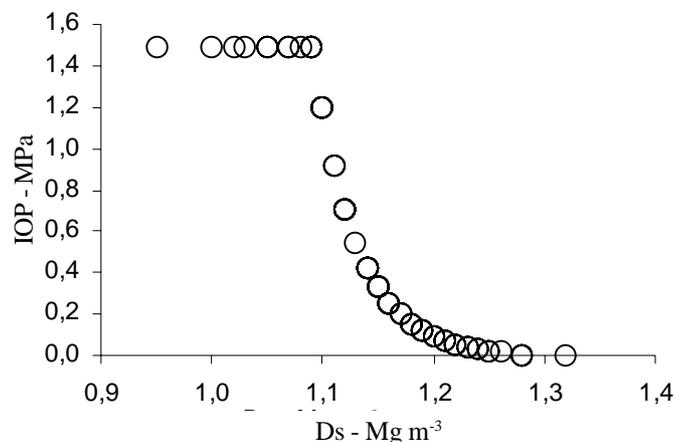


Figura 3. Variação do IOP com a densidade do solo

O uso de tensiômetros é recomendado para o controle da irrigação e para o cálculo da lâmina de água aplicada ao solo, tomando como limite inferior o potencial de 0,08 MPa. Como pode ser visto na Figura 4, a partir de 1,21 Mg m^{-3} a RP substitui o potencial de 0,08 MPa, como fator limitante ao desenvolvimento vegetal, dentro da faixa de umidade adotada no manejo da irrigação. De acordo com a Figura 2, 20% das amostras têm valores de densidade iguais ou superiores a 1,21 Mg m^{-3} . Admitindo-se que cada amostra representa a mesma área, em 20% da área irrigada a lâmina de irrigação deve ser estabelecida tendo como limite inferior o potencial no qual a resistência é crítica e não o valor estático de 0,08 MPa. Na área restante, a lâmina de irrigação pode ser determinada tomando-se como limites a capacidade de campo e o potencial de 0,08 MPa, uma vez que neste intervalo não se verificam

limitações por resistência excessiva e/ou aeração deficiente. Esta constatação corrobora com os resultados obtidos por Libardi & Saad (1994) os quais obtiveram elevadas produtividades na cultura de feijão irrigado e sem deficiência hídrica, neste solo.

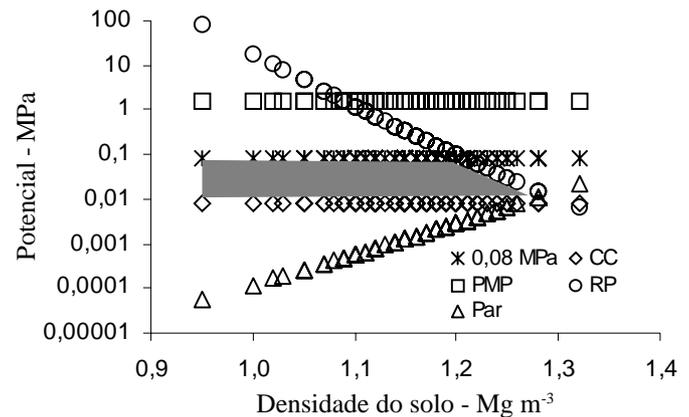


Figura 4. Variação do potencial matricial nos níveis críticos da CC, PMP, Par, RP e do potencial matricial adotado para o controle da irrigação

Na $D_s = 1,29 \text{ Mg m}^{-3}$, a resistência à penetração atinge o valor crítico em potencial correspondente à capacidade de campo (Figura 3). A partir deste valor de D_s , tanto aeração como resistência são limitantes à expansão radicular e, conseqüentemente, ao crescimento das plantas (Weaich et al., 1992) mesmo com total disponibilidade de água no solo.

O controle da irrigação é feito monitorando-se a água do solo sem se levar em conta outros fatores físicos que dependem da sua condição estrutural e que são modificados de forma dinâmica com a aplicação de água. A avaliação conjunta dos potenciais críticos para a máxima disponibilidade de água (CC – PMP), para resistência à penetração e para porosidade de aeração, permite identificar possíveis fatores físicos limitantes ao desenvolvimento das plantas e otimizar os fatores de produção e de manejo na agricultura irrigada. A utilização do IOP permite quantificar, num solo com estrutura degradada, a ocorrência de limitações por aeração e/ou resistência à penetração dentro da faixa de valores de potencial matricial utilizada para o manejo da irrigação. Neste contexto, o IOP pode ser utilizado para quantificar o grau de compactação em solos irrigados e como critério para adoção de práticas de manejo de descompactação do solo. Considerando-se os critérios utilizados para a definição do IOP neste estudo, é de grande importância que sejam adotadas práticas para a redução da densidade do solo nas áreas onde o seu valor seja igual ou superior 1,29 Mg m^{-3} (Figuras 3 e 4). Nestas áreas, o benefício promovido pela irrigação, no sentido de se buscar a produção ótima do ponto de vista econômico, pode não ser alcançado, uma vez que outros fatores físicos do solo impedem a adequada utilização da água disponível.

Em termos de manejo de irrigação, diferentes estratégias podem ser adotadas no sentido de se otimizar a disponibilidade de água para as plantas, em função da análise da relação entre o IPO e valores de densidade para o solo. Quanto mais restritivo for o IPO, mais freqüentes e mais leves devem ser as irrigações. Embora tendendo a menores eficiências de irrigação, a umidade do solo será mantida em níveis mais elevados, minimizando os

problemas de resistência à penetração das raízes, além de reduzir os inconvenientes do comprometimento da aeração, os quais tendem a se intensificar em condições de aplicações pesadas de água. O valor mais indicado do potencial para se proceder à irrigação, deve ser definido em função da distribuição dos valores de densidade na área e a relação desses valores com o IPO para o solo em questão.

No contexto do manejo de recursos em áreas específicas, a distribuição espacial de valores de densidade do solo pode fornecer subsídios para a tomada de decisão sobre a adoção de práticas de descompactação do solo. Tais práticas poderiam ser conduzidas somente naquelas áreas onde a relação entre valores de densidade e IPO mostram a condição física desfavorável ao desenvolvimento das plantas, segundo determinado critério de manejo. De forma semelhante, o manejo da água pode ser realizado levando-se em conta a distribuição espacial da densidade do solo, o que permite descrever a distribuição espacial do IOP. Para a utilização eficaz desses conceitos no contexto da agricultura de precisão, a distribuição espacial das variáveis deve ser identificada, o que pode ser implementado com o uso de técnicas geoestatísticas.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que:

1. O IOP apresentou relação inversa à densidade do solo, assumindo valores entre 0 e 1,49 MPa, para uma correspondente variação de densidade entre 1,32 e 0,95 Mg m⁻³.
2. Para valores de densidade do solo superiores a 1,09 Mg m⁻³, o potencial para o qual a resistência à penetração é de 2,0 MPa, determinou o limite superior do IOP. O limite inferior do IOP foi o potencial referente à capacidade de campo para valores de densidade do solo menores que 1,28 Mg m⁻³. A partir deste valor, o potencial limite foi aquele referente à porosidade de aeração de 10%.
3. O potencial de 0,08 MPa, adotado para fins de manejo de irrigação, constitui o limite superior do IOP para densidades menores que 1,21 Mg m⁻³; para valores superiores de densidade do solo, o potencial foi aquele referente a resistência à penetração de 2,0 MPa.
4. Em função da variabilidade da estrutura do solo, o manejo da água em agricultura irrigada, para fins de produção ótima das culturas, deve levar em conta não apenas os limites convencionais da faixa de disponibilidade de água mas, também, os outros fatores incorporados ao IOP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, E.; HSIAO, T.C.; HENDERSON, D.W. Immediate and subsequent growth response of maize leaves to changes in water status. **Plant Physiology**, Rockville, v. 48, p. 631-636, 1971.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: America Society of Agronomy, 1986. cap. 13, p.363-375.
- BOONE, F.R. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p. 283-324, 1988.
- BOONE, F.R.; VAN DER WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAAG, B.A. BOERS, A. The effect of compaction of arable layer in a sandy soils on the growth of maize for silage. I. Critical potentials in relation to soil aeration and mechanical impedance. **Netherlands Journal of Agricultural Research**, Amsterdam, v. 34, p. 155-171, 1986.
- BOONE, F.R.; van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAAG, B.A.; BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. **Netherlands Journal of Agricultural Research**, Amsterdam, v. 35, p. 113-128, 1987.
- BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. VAN. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. cap. 11, p.237-264.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 33, p. 519-524, 1990.
- CAMPBELL, G.S. Soil water potential measurement: an overview. **Irrigation Science**, New York, v. 9, p. 265- 273, 1988.
- DENMEAD, O.T. & SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, p. 385-390, 1962.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO. 1977. 144 p. Irrigation and Drainage Paper 24
- GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P.; FRANCHI, S.A. de. Compaction effects on soil structure. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 42, p. 331-338, 1988.
- HENDRICKX, J.M.H.; WIERENGA, P.J. Variability of soil water tension in a trickle irrigated chili pepper field. **Irrigation Science**, New York, v. 11, p. 23- 30, 1990.
- HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (editors). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph, ASAE Monograph. 1990. 1040 p.
- JAYAWARDANE, N.S.; CHAN, K.Y. The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils – A Review. **Australian Journal of Soil Science**, Melbourne, v. 32, p. 13-44, 1994.
- JENSEN, C.R.; MOGENSEN, V.O.; POULSEN, H.H.; HENSON, I.E.; AAGOT, S.; HANSEN, E.; ALI, M.; WOLLENWEBER, B. Soil water matric potential rather than water content determines drought responses in field-grown lupin (*Lupinus angustifolius*). **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, p. 353-363, 1998.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory Methods. In A. Klute (ed). **Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Methods**. Madison, America Society of Agronomy, cap. 26, p. 635-660. 1986.
- KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic Press. 1995. 495 p.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

- LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigado por pivô central em Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 529-532, 1994.
- LIZASO, J.I.; RITCHIE, J.T. Maize shoot and root response to root zone saturation during vegetative growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 125-134, 1997.
- MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O.; SAAD, A.M.; LIBARDI, P.L. Variabilidade do potencial matricial e do conteúdo de água num solo em experimento de manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 563-571, 1998.
- MEYER, W.S.; BARRS, H.D. Roots in irrigated clay soils: Measurement techniques and responses to rootzones conditions. **Irrigation Science**, New York, 12:125-134, 1991.
- RITCHIE, J.T. Soil water availability. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 58, p. 327-338, 1981.
- SAAD, A.M. **Apoio tecnológico à agricultura irrigada no município de Guaira, SP**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1987. 59p.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 844-851, 1996.
- SILVA, A.P. da; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 877-883, 1997.
- SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.
- SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of south African forestry soils. **Geoderma**, New York, v. 78, p. 93-111, 1997.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. **SAS/STAT Procedure guide for personal computers**. Version 5, Cary, SAS Institute, 1991.
- STEELE, D.D.; SCHERER, T.F.; PRUNTY, L.D.; STEGMAN, E.C. Water balance irrigation scheduling: comparing crop curve accuracies and determining the frequency of corrections to soil moisture estimates. **Applied Engineering in Agriculture**, New York, v. 13, p. 593-599, 1997.
- STIRZAKER, R.J. Processing tomato response to soil compaction and fumigation. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Canberra, v. 37, p. 477-483, 1997.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.
- TAYLOR, S.A. Managing irrigation water on the farm. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 8, p. 433-436, 1965.
- TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Technical report nº 2 - Soil Quality Evaluation Program. Agriculture and Agri-Food Canada. 36p, 1994.
- TOPP, G.C.; ZEBTCHUK, W. The determination of soil water desorption curves for soil cores. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 59, p. 19-26, 1979.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.
- WEAICH, K.; BRISTOW, K.L.; CASS, A. Preemergent shoot growth of maize under different drying conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 1272-1278, 1992.