

USO DA DIMENSÃO FRACTAL PARA ESTIMATIVAS DE PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO

FRANCISCO J. R. DA PAIXÃO¹; ANTONIO R. S. ANDRADE²; CARLOS A. V. DE AZEVEDO³; EULER S.F.¹; VANDA M. L.¹; JOSE D. NETO³; VERA A. LIMA³

1 - MSc Eng. Agric. Doutorando, DEAg/CCT/UFCG, Campina Grande–PB, e-mail: jardel.paixao@gmail.com;

2 - Pesquisador Dr. Bolsista DRC/CNPq, DEAg/CCT/UFCG, Campina Grande – PB, Br; 3 - Eng. Agric. Prof^a. Dra. DEAg/CCT/UFCG, Campina Grande – PB, Br.

Escrito para apresentação no
XVII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem - CONIRD
07 a 12 de outubro de 2007 – Mossoró - RN

RESUMO

Objetivando verificar a adequabilidade dos métodos da dimensão fractal na estimativa de propriedades físico-hídricas do solo tais como: curva de retenção, água disponível e condutividade hidráulica saturada, estimadas pela teoria fractal. Conduziu-se, na estação experimental da Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias da Paraíba, EMEPA-Lagoa Seca estado da Paraíba Brasil. A curva de retenção de água no solo foi estimada através dos modelos de Brooks e Corey, Brooks e Corey modificado para a dimensão fractal estabelecidas a partir das medições, em laboratório, da curva de retenção de água no solo, e Brooks e Corey definida para a dimensão fractal determinada a partir da curva de distribuição de partículas do solo determinada em laboratório. A condutividade hidráulica saturada foi estimada pela dimensão fractal do solo. Constataram-se. O uso da dimensão fractal nas estimativas da condutividade hidráulica saturada, permitiu avaliar satisfatoriamente essa propriedade hídrica do solo.

Palavra-chave: dimensão fractal, condutividade hidráulica, movimento de água do solo.

USE OF THE DIMENSÃO FRACTAL FOR ESTIMATES OF PROPERTIES PHYSICAL-HÍDRICAS OF THE SOIL

ABSTRACT

Aiming at to verify the adequabilidade of the methods of the dimension fractal in the estimate of properties physical-hídricas of the soil such an as: he/she curves of retention, available water and saturated hydraulic conductivity, dear for the theory fractal. He/she behaved, in the experimental station of the State Company of Agricultural Researches of Paraíba, EMEPA-pond Dries state of Paraíba Brasil. The curve of retention of water in the soil was esteemed through the models of Brooks and Corey, Brooks and Corey modified for the dimension established fractal starting from the measurements, in laboratory, of the curve of retention of water in the soil, and Brooks and defined Corey for the dimension certain fractal starting from the curve of distribution of particles of the soil determined at laboratory. The saturated hydraulic conductivity was dear for the dimension fractal of the soil. They were verified. The use of the dimension fractal in the estimates of the saturated hydraulic conductivity, allowed to evaluate that property hídrica of the soil satisfactorily.

Key words: dimension fractal, hydraulic conductivity, movement of water of the soil.

INTRODUÇÃO

A geometria fractal foi introduzida, nos anos 70, por Benoit Mandelbrot, matemático polonês, que propôs, através dela, uma maneira que possibilitasse melhor capacidade de representar estruturas complexas e irregulares da natureza. Ao contrário da geometria euclidiana, a fractal se apresenta como ferramenta eficientemente capaz de quantificar e qualificar série de dados temporais e espaciais descrevendo, com maior exatidão, a sua complexidade.

Pela definição de MANDELBROT (1982) citado por REICHARDT e TIMM (2004) e HOTT (2005), o termo fractal provém do latim *fractus*, que significa fragmentar, quebrar as partes, opostamente ao termo álgebra, que se refere à junção das partes, ou seja, fractais são objetos cujos valores de suas dimensões são números reais não inteiros; no entanto, a dimensão fractal descrita por Mandelbrot é uma medida do grau de irregularidade do objeto considerado em todas as escalas de observação, sendo que uma estrutura fractal é toda aquela em que partes dela se assemelham ao todo, ou seja, existem partes auto-similares, estatisticamente dentro da estrutura global.

Em ciências do solo, os fractais são utilizados para descrição do percurso de infiltração e redistribuição da água, além de modelar, de forma eficiente, a ocorrência de fenômenos durante esses dois processos, uma vez que o solo é um corpo tridimensional. A dimensão fractal pode ser determinada com alguns atributos físicos do solo, permitindo estudos com novas abordagens fundamentadas em parâmetros físicos, passando a ocupar o espaço de estudos utilizando-se parâmetros puramente empíricos (HOTT et al., 2005).

A dimensão fractal tem sido aplicada em solos levando-se em conta a distribuição das partículas e a tortuosidade dos poros do solo, com o objetivo de caracterizar o espaço poroso referente às propriedades de condução e retenção de água do solo, podendo-se avaliá-las pela dimensão fractal da distribuição das partículas (BACCHIET et al., 1996).

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Área Experimental da Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias – EMEPA, localizada no município de Lagoa Seca, Estado da Paraíba, a uma altitude média de 335 m, apresentando as coordenadas geográficas de 07° 13' S; 35° 52' W. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw'i (clima tropical úmido com estação seca da primavera a início do verão); a temperatura média anual é de 23,3 °C e a precipitação média anual de 764,3 mm, com período chuvoso se estendendo de outubro a março; o trimestre mais chuvoso vai de dezembro a fevereiro e o mais seco de junho a agosto, com umidade relativa média de 82,7%. O solo da área é classificado como um Neosolo Reolítico (EMBRAPA, 1999).

Os pontos amostrais para determinação da taxa de infiltração, condutividade hidráulica, curva de retenção, densidade do solo, água disponível e matéria orgânica, foram definidos de modo a permitir uma realização de testes de campo e coleta de solo, nas profundidades de 0-20, 20-40 e de 40-60 cm de profundidade, no centro de cada parcela experimental, totalizando 36 pontos amostrais.

Para determinação da taxa de infiltração realizaram-se testes através do método do infiltrômetro, de acordo com metodologia proposta pela EMBRAPA (1997), antes e após a realização de cada teste de infiltração, determina-se a umidade do solo, através do método gravimétrico.

O infiltrômetro consiste de dois cilindros concêntricos com altura de 40 cm e diâmetro de 30 e 50 cm para os anéis interno e externo, respectivamente (Figura 4). Os dois cilindros foram posicionados a 15 cm de profundidade e, durante a realização dos testes

dentro do cilindro interno, manteve-se uma carga de água constante de aproximadamente 15 cm em relação à superfície do solo, a qual foi mantida por controle manual através de um registro de ação rápida, devidamente ajustado a uma mangueira que alimenta o cilindro interno; o externo foi abastecido manualmente. A taxa de infiltração no campo (cm h^{-1}) para os 36 testes realizados na área experimental, foi definida pela diferença entre os valores sequenciais de cada leitura (carga de água) no cilindro interno, sendo os tempos de cada leitura 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 e 160 min até o instante dessa diferença se tornar nula, repetindo-se a leitura mais três vezes.

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) na parcela experimental, foi determinada através de medidas de infiltração de água, pelo método do Infiltrômetro de anel, conforme metodologia descrita por LIBARDI (2000), permitindo-se monitorar a velocidade de infiltração até sua estabilização ao longo do tempo, assumindo um valor constante denominado velocidade de infiltração básica, donde se calcula a condutividade hidráulica saturada (K_s), através da Eq. 1. Esta velocidade básica de infiltração (V_b) é tão somente o valor da assíntota da velocidade de infiltração final (V_f) na curva de infiltração:

$$K_s = \frac{V_b L}{(L + h)} \quad (1)$$

Donde:

V_b - Velocidade de infiltração básica de água no solo (cm h^{-1});

L - Profundidade do anel enterrado no solo (cm);

h - Carga hidráulica (cm)

A equação empírica capaz de estimar K_s neste trabalho se baseia na tortuosidade dos poros do solo, na qual foi proposta por POULSEN et al. (1999) e modificada por ANDRADE (2002) com uso da aproximação fractal na qual será usada neste trabalho, ficando da seguinte forma:

$$K_s = 8,64 \cdot 10^{-6} \frac{\rho_{H_2O} g}{\eta} \left(\frac{0,45 r^2 (\mu_{10})^D}{8 \theta_s^2} \right)^{(3-D)} \quad (2)$$

Em que: ρ - densidade da água (1.106 g m^{-3}); g - aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$); η - viscosidade da água (1.005 m s^{-2}); μ_{10} - porosidade drenável na tensão de 10 Kpa; θ_s - umidade do solo na saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); D - corresponde a dimensão fractal do solo determinada pela distribuição do tamanho das partículas sólidas do solo (D_{PSD}) (adimensional); r - tamanho médio do raio de poros do solo.

Para se estimar K_s usando-se a Eq. (2), é necessário determinar os parâmetros D , μ_{10} , θ_s e r , em que D foi estimada com base na distribuição granulométrica das partículas sólidas do solo, denominado de método; D_{PSD} e com base na curva de retenção de água no solo, D_{SWRC} .

Como já definido, esta curva relaciona determinada tensão (potencial matricial) e a umidade do solo, refletindo a distribuição do tamanho dos poros do solo e sua sinuosidade, razão por que em sua determinação, é imprescindível utilizar metodologias que reproduzam a verdadeira condição estrutural do solo, desta forma foi utilizado indireto e ajustado por meio do modelo proposto por Brooks e Correy e modificado com o uso da aproximação fractal (PIERRER et al., 1996) expressa pela Eq. 5. No presente trabalho a curva de retenção de água do solo foi determinada em laboratório usando-se o Extrator de Umidade de

Reichardt, nas tensões de 10, 33, 100, 300, 500, 1000 e 1500 kPa, segundo a metodologia descrita por GUERRA (2000).

A análise granulométrica foi realizada pelo Método do Hidrômetro, como recomendado por BOUYOUCOS (1951). Na análise textural, a dispersão foi obtida mecânica (agitação) e quimicamente utilizando-se, como dispersante, o hidróxido de sódio IN.

A disponibilidade de água no solo para as plantas foi calculada pela diferença de umidade gravimétrica entre a capacidade de campo (10–30 kPa) e o ponto de murcha permanente (1500 kPa), com o qual se trabalhou, neste experimento, usando-se o conteúdo de umidade do solo relacionado ao potencial matricial de 100 kPa (REICHARDT e TIMM, 2004; EMBRAPA, 1997).

A estimativa da dimensão fractal (D) que foi usada nos modelos matemáticos da curva de retenção de água foi estimada com base nos dados da curva de retenção de água no solo (D_{SWRC}). FRISEN e MIKULA (1987) derivaram uma equação que relaciona o incremento entre o volume de poros com o diâmetro dos raios com uso da dimensão fractal, dada por:

$$-\frac{dV(\geq r)}{dr} \propto r^{2-D} \quad (3)$$

em que: $V(\geq r)$ é o volume de poros com raio maior ou igual a r e D representa a dimensão fractal que descreve a superfície dos poros que, por sua vez, formam as partículas do solo. Uma maneira mais específica entre o volume de poros e o seu raio, foi encontrada por PERRIE et al. (1996) e se escreve da seguinte forma:

$$-\frac{dV(\geq r)}{dr} = \beta(E - D)r^{E-D-1} \quad (4)$$

em que: E - representa a dimensão euclidiana, β - uma constante. A curva de retenção de água no solo pode ser obtida integrando a equação (2) da seguinte maneira:

$$\theta(r) = \int_{r_{\min}}^r r^{2-D} dr \quad (5)$$

Onde: $\theta(r)$ - corresponde ao conteúdo de água nos poros de raio r ; r - raio do poro; r_{\min} - raio mínimo de poros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo da área em estudo apresenta a camada superficial bastante arenosa, seguida da última camada com um acréscimo progressivo do teor de argila, tendo a seguinte composição: de 00-20cm: areia; 75,27 g kg⁻¹, silte; 8,08 g kg⁻¹ e argila; 16,65 g kg⁻¹ de 20-40cm: areia; 72,24 g kg⁻¹, silte; 10,10 g kg⁻¹ e argila; 17,66 g kg⁻¹, sendo caracterizado como um solo franco-arenoso nas duas profundidades, respectivamente. Realizaram-se as determinações dos valores de D_{SWRC} com os dados experimentais da curva de retenção de água no solo para as três profundidades em estudo.

Baseando-se nos valores estimados pelas dimensões fractais D_{PSD} e D_{WRC} , para a profundidade de 0-20 cm. Para estimar a condutividade hidráulica saturada (K_s), substituíram-se os valores das dimensões fractais D_{PSD} e D_{WRC} na Eq. 4.

Na Tabela 1 está descrito o resumo estatístico da condutividade hidráulica saturada do solo (K_s). Os valores do desvio padrão (DP) (31,440%) e do coeficiente de variação (CV) (63,123%) para K_s quando determinada pelo método do cilindro Infiltrômetro (método adotado como padrão nesta pesquisa) indicam uma alta variabilidade dos valores médios da K_s , mesmo levando-se em consideração a pequena área estudada.

Tabela 1. Valores médios experimentais e estimados da condutividade hidráulica do solo saturado, para as três profundidades do solo, Campina Grande, PB, 2006

Parâmetros estatísticos	Condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1})		
	K_s - Infiltrômetro	K_s - D_{SWRC}	K_s - D_{PSD}
Média	0,50074	0,14738	0,17250
Variância	0,09885	0,00438	0,00773
Desvio padrão	31,440	6,621	8,794
Coef. de variação - CV (%)	63,123	55,82465	81,90016
Valor máximo	1,26022	0,28969	0,49005
Menor valor	0,06471	0,07025	0,06882
Amplitude total	1,19551	0,21943	0,42123
Erro padrão de estimativa (Er)	-----	8,082	7,387
Coef. de assimetria	0,38186	0,98770	1,81928
Coef. de curtose	-0,66241	-0,19633	4,20031

Analizando os valores médios da condutividade hidráulica do solo ilustrados na Tabela 1, de acordo com o U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering, indicam que a área estuda apresenta classificação de condutividade hidráulica moderada, na profundidade estudada (0-20 cm), quando estimados pelos métodos D_{PSD} e D_{WRC} . Porém, os menores valores de CV (%) e DP foram constatados quando a K_s foi prognosticada pelos dois métodos com o uso da aproximação fractal (D_{SWRC} e D_{PSD}).

Pode-se constatar que os menores erros relacionados com as estimativas dos modelos usados para determinação de K_s foram para o método D_{PSD} ($Er = 7,387$). KLAR (1991), LIBARDI (2000) e REICHARDS e TIMM (2004) salientam que a condutividade hidráulica está relacionada com a granulometria e com a geometria dos poros do solo, sendo esta última não estática, mas sim dinâmica, uma vez que o fluxo de água no solo poderá modificar o arranjo estrutural do mesmo, afetando a geometria de seus poros; assim sendo, a condutividade hidráulica do solo pode variar de solo para solo e para um mesmo solo, dependendo de sua porosidade e grau de compactação.

Para as condições de campo desta pesquisa, onde se tinha um solo franco arenoso, o método D_{SWRC} não foi capaz de prever a K_s com certa exatidão, quando comparada com a K_s medida em campo ($Er = 8,082$). Entretanto, ANDRADE (2000), trabalhando com solos de textura franco argilosa do estado de São obteve bons resultados da K_s com a aplicação do método baseado na dimensão fractal obtida pela curva de retenção de água no solo (D_{SWRC}).

CONCLUSÕES

Observam-se valores elevados do parâmetro estatístico erro padrão de estimativa (ER), indicando erros na estimativa dos valores da condutividade hidráulica saturada (K_s), porém se justifica o uso da técnica da aproximação fractal tendo em vista a rapidez e o baixo custo com que se obtém essa propriedade hídrica do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ANDRADE, A. R. S. de. Características físico-hídricas dos solos da estação experimental da Embrapa-algodão: Variabilidade espacial. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1997. 78p. Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) – UFPB, Universidade Federal da Paraíba, 1997.
- AGNESE, C., CRESCIMANNO, G., LOVINO, M. On the possibility of predicting the hydrological characteristics of soil from the fractal structure of porous media. ANN. Geophys., 12, Suppl. II, 1994. 482p.
- ANTONIO, F. C.; DORFMAN, R., Manual de ensaios de laboratórios e campo para irrigação e drenagem. Nobel, 125-146p. 1986.
- BACCHI, O.O.S., REICHARDT, K., VILLA NOVA, N.A. Fractal scaling of particle and pore size distributions and its relation to soil hydraulic conductivity. Sei. Agric., v.53, n.2, p. 1-9, 1996.
- HOTT, M. C.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. Á. S.; GRIFFITH, J. J. Análise fractal de textura usando um operador de Hurst em uma imagem TM/Landsat. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 4089-4093. IN. Anais.
- LAUX, P. R.; PEREIRA, R. S. Revisão do Modelo de Geometria Fractal. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 4103-4110. IN. ANAIS
- PERFECT, E. McLAUGHLIN, N.B., KAY, B.D., G.C. An improved fractal equation for the soil water retention curve. Water Resour. Res., v.32, p.281-287, 1996.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. Utilizing fractal principles for predicting soil hydraulic properties. J. Soil and Water Cons., v.50, p.463-465, 1995.
- REICHARDT, K & TIMM, L. C. SOLO PLANTA E ATMOSFERA, Conceitos, processos e aplicações. Manole editora Piracicaba- São Paulo, 2004, 471p.
- RIEU, M., SPOSITO, G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. theory. Soil Sci. Soc. Am. J., v.55, p.1231-1238, 1991.
- TYLER, S.W., WHEATCRAFT, S.W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. Soil Sci. Soc. Am. J., v.56, p.362-369, 1992.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society American Journal, v.44, p.892-898, 1980.