



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E
BIOTECNOLOGIA DA REDE BIONORTE**



**ANÁLISE FRACTAL E MULTIFRACTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À
PENETRAÇÃO**

JAIRO OSVALDO RODRIGUEZ LEIVA

**São Luís – MA
Novembro/2018**

JAIRO OSVALDO RODRIGUEZ LEIVA

**ANÁLISE FRACTAL E MULTIFRACTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À
PENETRAÇÃO**

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede BIONORTE, na Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Biodiversidade e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. Glécio Machado Siqueira.

**São Luís – MA
Novembro/2018**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Leiva, Jairo Osvaldo Rodriguez.

Análise fractal e multifractal da resistência do solo à penetração / Jairo Osvaldo Rodriguez Leiva. - 2018.

91 f.

Orientador(a): Glécio Machado Siqueira.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Rede - Rede de Biodiversidade e Biotecnologia da Amazônia Legal/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Compactação do solo. 2. Espectro de singularidade.
3. Função de partição. 4. Manejo e conservação do solo.
5. Modelagem matemática. I. Siqueira, Glécio Machado.
II. Título.

JAIRO OSVALDO RODRIGUEZ LEIVA

**ANÁLISE FRACTAL E MULTIFRACTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À
PENETRAÇÃO**

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede BIONORTE, na Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Biodiversidade e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. Glécio Machado Siqueira.

Banca examinadora

Prof. Dr. Glécio Machado Siqueira
Orientador - Presidente da banca

Prof. Dr. Eduardo Bezerra Almeida Júnior
Examinador 2

Prof. Dr. Khalil de Menezes Rodrigues
Examinador 3

Prof. Dr.^a. Régia Maria Reis Gualter
Examinador 4

Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva
Examinador 5

**São Luís – MA
Novembro/2018**

*Dedico esta tese a minha família.
Na plenitude do inverno eu aprendi que no meu interior há um verão invencível
Albert Camus*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força em continuar sempre.

Aos meus pais Sofonias Rodriguez e Maria Concepción Leiva pela educação, compreensão e incentivo para que eu pudesse seguir meus passos.

A minha namorada Sandra Elizabeth Ruano Martinez pelo principal incentivo para que esse sonho se tornasse uma realidade.

A meus filhos Maria Fernanda e Jose Daniel pelo entendimento nos meus momentos de ausência.

A meus irmãos Sandra, Natalia, Nancy, Edwin, que me apoiam nas horas difíceis, onde sem o apoio de minha família não estaria realizando a conclusão desta etapa.

Agradeço à Universidade Federal do Maranhão e ao Programa de Pós-Graduação BIONORTE-Rede de Biodiversidade e Biotecnologia da Amazônia legal pela oportunidade de me desenvolver como profissional.

Ao meu orientador e amigo, Professor Dr. Glécio Machado Siqueira, pelo apoio, dedicação, pela atenção em todos os momentos, que nos deu a oportunidade de realizar este projeto e sempre esteve presente nos orientandos nas tomadas de decisões, tornando possível que eu chegasse ao final da jornada.

A minha Amiga Raimunda Alves Silva, companheira e colega, que incentivou cada dia, por muitas vezes ter acumulado trabalho para permitir que eu conseguisse concluir o curso.

Aos amigos, Victor, Anderson, Cid, Brunno, Poena, Alana, por todo apoio, incentivo, ajuda nos trabalhos de laboratório, na elaboração e execução do projeto.

A OEA –Organização dos Estados Americanos e Grupo Coimbra no período de março de 2016 ate fevereiro de 2018 pelo apoio financeiro.

A FAPEMA-Fundação de amparo á pesquisa e ao Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico do Maranhao (UNIVERSAL-001160/17 e BD-02105/170 e ao CNPq- Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico (429354/2016-9, 307619/2016-8 e 103961/2018-6).

***“Ensina-nos a contar os nossos dias
para que o nosso coração alcance sabedoria.”***

Salmo 90:12

RESUMO

A produtividade das culturas é afetada negativamente pela resistência do solo à penetração (RP), podendo essa RP interferir no desenvolvimento das raízes e apresentar alta variabilidade horizontal e vertical. Assim, o objetivou-se desta pesquisa avaliar a RP por meio de técnicas fractais e multifractais em perfis verticais. Os dados foram obtidos em duas áreas experimentais, uma cultivada com cana-de-açúcar e outra com soja. Em ambas as áreas, 60 pontos de amostragem (cana-de-açúcar) e 70 (soja) foram marcados com a ajuda de um GPS com correção diferencial. A área com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) possui 6,85 ha e está localizada no município de Coelho Neto (MA) com irrigação por pivot linear no período seco. A área com soja (*Glycine max* L.) cultivada sob plantio direto possui 44,75 ha e esta localizada no município de Mata Roma (MA). A RP, na camada de 0.0-0.6 m em cada um dos pontos de amostragem, foi determinada por meio de penetrômetro de impacto modelo Planalsucar-Stolf, sendo a mesma RP foi avaliada a cada 0,01 m para permitir a análise estatística e multifractais dos dados. Os gráficos da RP foram construídos em profundidade para cada um dos perfis. Visando-se possibilitar a análise estatística e multifractal dos dados. Nas culturas estudadas, a análise multifractal permitiu a identificação de padrões em diferentes escalas e com alta heterogeneidade. O comportamento multifractal foi representado pelo espectro de singularidade (α) versus $f(\alpha)$, e pela dimensão generalizada (Dq). A análise multifractal permitiu a diferenciação entre os perfis das unidades de relevo (Tipo A, B, C e D) na cultura de cana-de-açúcar; O uso de técnicas multifractais na cultura da soja para o estudo da RP nos 70 pontos de amostragem e nas pedoformas Tipo A e Tipo B, permitiu a identificação de heterogeneidade dos dados de RP mínimo que não são detectados por meio de análises clássicas. Portanto o estudo da RP nas diferentes pedoformas permitiu descrever maior heterogeneidade de escala para a forma de relevo côncava, demonstrando que a análise fractal foi eficiente para se averiguar as diferenças na RP ao longo da paisagem para os perfis verticais.

Palavras-Chave: Função de partição; Espectro de singularidade; Modelagem matemática; Compactação do solo; Manejo e conservação do solo.

ABSTRACT

The productivity of the crops is negatively affected by the resistance of the soil to the penetration (PR), which can interfere in the development of roots and present high horizontal and vertical variability. Thus, the objective of this research was to evaluate PR through fractal and multifractal techniques in vertical profiles. The data were obtained in two experimental areas, one cultivated with sugarcane and the other with soybean. In both areas, 60 sampling points (sugarcane) and 70 (soybean) are marked with the help of a GPS with differential correction. The area with sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) is 6.85 ha and is located in the municipality of Coelho Neto (MA) with irrigation by linear pivot in the dry period. The area under soybean (*Glycine max* L.) cultivated under no-tillage has 44.75 ha and is located in the municipality of Mata Roma (MA). The PR, in the 0.0-0.6 layer each of the sampling points, was determined by means of a Planalsucar-Stolf impact penetrometer, the same PR being determined every 0.01 m to allow statistical analysis and multifractal data. The PR charts were constructed in depth for each of the profiles. Aiming to enable the statistical and multifractal analysis of the data. In the cultures studied, multifractal analysis allowed the identification of patterns at different scales and with high heterogeneity. The multifractal behavior was represented by the singularity spectrum (α) versus $f(\alpha)$, and by the generalized dimension (D_q). The multifractal analysis allowed the differentiation between the profiles of the relief units (Type A, B, C and D) in the The use of multifractal techniques in the soybean crop for the study of PR in the 70 sampling points and in the Type A and Type B pedoforms allowed the identification of heterogeneity of the RPminimum data that are not detected by The study of PR in the different pedoforms allowed us to describe greater heterogeneity of scale for the shape of concave relief, demonstrating that the fractal analysis was efficient to ascertain the differences in PR throughout the landscape for the vertical profiles.

Keywords: Partition function; singularity spectrum; Mathematical modelling; Soil compaction; Management and conservation of soil.

LISTA DE FIGURAS

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
Figura 1. Representação da geometria da curva de Koch.....	17
4 ANÁLISE MULTIFRACTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇUCAR	
Figura 1. Mapa topográfico e esquema contendo os 60 pontos de amostragem casualizados e a identificação das unidades de relevo.....	31
Figura 2. Média e desvio padrão para os 60 perfis verticais de RP na área de estudo cultivada com cana-de-açúcar.....	34
Figura 3. Perfis verticais de RP na camada de 0.0-0.6 m de profundidade para as diferentes unidades de relevo (Type A, B, C and D) na área de estudo cultivada com cana-de-açúcar.....	36
Figura 4. Função de partição $x(q, \delta)$ para a resistência do solo à penetração para um perfil de cada na unidade de relevo: A. Type A – profile 21, B. Type B – profile 2.6, C. Type C – profile 27 and D. Type D – profile 28.....	39
Figura 5. Espectro de singularidade para a resistência do solo a penetração (MPa) nas unidades de relevo: A. Type A (profiles 2, 7, 10 e 21); B. Type B (profiles 11, 13, 16 e 26); C. Type C (profiles 18, 22, 25 e 27) and D. Type D (profiles 28, 41, 47 e 60).....	41
Figura 6. Mapas de variabilidade espacial para for mean and maximum PR at the 0 -60 cm depth, as well as the parameters PR D_{10} - D_{-10} , PR α_0 - α_{10} and Hurst exponent (H).....	42
5 PADRÕES MULTIFRACTAIS DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM DIFERENTES PEDOFORMAS	
Figura 1. Mapa de relevo e localização amostral dos 70 pontos com espaçamento de 100 m x 35 m na área de estudo.....	49
Figura 2. Média e desvio padrão para os 70 perfis, unidades A e B verticais de RP na área de estudo cultivada com soja.....	52
Figura 3. Função de partição $\chi(q, \delta)$ para a resistência do solo a penetração para 70 pontos amostrais (máximo, média e mínimo), Unidade A (máximo, média e mínimo) e Unidade B (máximo, média e mínimo) em cultivo de soja.....	55
Figura 4. Espectro de singularidade para a resistência do solo a penetração (MPa) nas unidades de relevo.....	57

LISTA DE TABELA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
Tabela 1: Relação de estudos sob valores críticos de RP para desenvolvimentos radicular de plantas.....	22
4 ANÁLISE MULTIFRACTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇUCAR	
Tabela 1. Estatística descritiva para os quatro padrões da resistência do solo a penetração.....	37
Tabela 2. Multifractal parameters obtained from the generalised dimension, (D_{-10} - D_{10} , D_{-10} , D_{10} , D_0 , D_1 and D_2) and from the singularity spectra, (q_+ , q_- , α_0 , α_{max} and α_{min}).....	39
5 PADRÕES MULTIFRACTAIS DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM DIFERENTES PEDOFORMAS	
Tabela 1. Caracterização física e química do Latossolo Amarelo Distrófico argissólico cultivado com soja sob semeadura direta.....	49
Tabela 2. Conjunto de equações utilizadas na análise multifractal.....	51
Tabela 3. Estatística descritiva para as três unidades da resistência do solo a penetração.....	53
Tabela 4. Parâmetros multifractais obtidos para a dimensão generalizada, (D_{-10} - D_{10} , D_{-10} , D_{10} , D_0 , D_1 e D_2) e espectro de singularidade (q_+ , q_- , α_0 , α_{max} e α_{min}).....	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Modelagem matemática.....	16
2.2 Geometria fractal e multifractal.....	16
2.2.1 Aplicações da Geometria Fractal.....	19
2.2.2 Análise Multifractal.....	20
2.3 Referências.....	23
3 HIPÓTESE E OBJETIVOS	28
3.1 Hipóteses.....	28
3.2 Objetivo Geral.....	28
3.3 Objetivos específicos.....	28
4 MULTIFRACTAL ANALYSIS OF THE RESISTANCE OF SOIL TO PENETRATION UNDER CULTIVATION OF SUGARCANE	30
Introduction.....	30
Material and Methods.....	32
Results and Discussion.....	35
Conclusions.....	43
Acknowledgment.....	43
Literature Cited.....	44
5 PADRÕES MULTIFRACTAIS DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM DIFERENTES PEDOFORMAS	48
Introdução.....	48
Material e Métodos.....	50
Resultados e Discussão.....	54
Conclusões.....	62
Agradecimentos.....	63
Referências.....	63

CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
ANEXOS	70
ANEXO A – Normas da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.....	71
ANEXO B – Normas da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola.....	83

1 INTRODUÇÃO

A elevada variabilidade e heterogeneidade dos solos em diferentes escalas, torna , necessário o uso de técnicas adequadas para a caracterização das variações horizontais e verticais dos atributos do solo ao longo da paisagem, como dependência de escala muito variáveis. Neste sentido, sobre tais condições aplicação de técnicas de geometria multifractal.mostrase-se ideal.

A geometria fractal tem a capacidade de estabelecer relações entre varios atributos e fatores de conformação do solo que interagem e estão ligados ao comportamento fractal ou multifractal. Vários estudos da área de física do solo foram realizados, como no caso da quantificação, heterogeneidade e conectividade de poros do solo/espaco sólido usando fractal (PACHESPSKY et al., 1996), ou por técnicas multifractais. (TARQUIS et al., 2003; PAZ-FERREIRO et al., 2010). Da mesma maneira, VIDAL VÁZQUEZ et al. (2005, 2007), VIDAL VÁZQUEZ et al. (2008) e GARCÍA et al. (2010) utilizaram modelos fractais e multifractais para o estudo do microrelevo na superfície do solo. e modelos multifractais. No tópico referente aos perfis verticais do solo, os estudos de SIQUEIRA et al (2013) e WILSON et al (2016) são tomados como referência, em estudo multifractal da resistência do solo à penetração em profundidade. Vale ressaltar que as atividades agrícolas modificam a variabilidade natural do solo, ocorrendo situações positivas e outras negativas.

Segundo BOTTEGA et al. (2013) a caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo devem incorporar questões de paisagem, visando uma maior representatividade amostral, e que seja capaz de diagnosticar as mais diversas variações, tornando-se prática indispensável para otimizar o processo de produção e reduzir os impactos ambientais causados pelas práticas agrícolas.

O conhecimento da dinâmica entre os diferentes atributos de solo e planta e os processos ambientais, representam a capacidade produtiva de um solo. Nesse sentido, é necessário gerar informações sobre a contribuição de práticas agrícolas na manutenção da qualidade do solo (STONE et al., 2013). Com isso, os sistemas de manejo devem integrar os diferentes atributos e processos dinâmicos, gerando cenários positivos ou negativos para o desenvolvimento das culturas (VIEIRA et al., 2011). Tal conhecimento favorece ainda alcançar produtividades ótimas, sem a necessidade da abertura de novas áreas agrícolas e favorecendo a manutenção de áreas naturais.

Para CARNEIRO et al. (2009) é de extrema importância a avaliação dos atributos e processos em ambientes agrícolas degradados, uma vez que fornecem subsídios para o uso racional do solo, e manejo e manutenção dos agroecossistemas de maneira sustentável. Desse modo, é sabe-se que os diferentes usos e manejos do solo podem degradar suas propriedades biológicas, físicas e químicas. Portanto, é preciso compreender o solo de maneira holística, para que então sejam desenvolvidas práticas de manejo sustentável. Na atualidade, um dos principais fatores limitantes para o desenvolvimento da agricultura sustentável, é o desenvolvimento agrícola com mínimo impacto sobre o estado de compactação de um solo. O uso e manejo do solo sem respeitar as suas características naturais, favorece o aumento da compactação, ocasionando a degradação ambiental.

Uma das maneiras para se avaliar o estado de compactação de um solo, é dado por meio do conhecimento da sua resistência à penetração (RP, MPa). A resistência do solo a penetração é um importante atributo do solo sendo de fácil mensuração e relacionada a diferentes atributos do solo como: textura, conteúdo de água e conteúdo de matéria orgânica (PIGNATARO NETTO et al., 2009; STONE et al., 2013; GOMIDE et al., 2011; VIEIRA et al., 2011), no entanto, poucas pesquisas utilizam análises fractais e multifractais para o entendimento da dinâmica da resistência do solo à penetração do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelagem matemática

A Modelagem matemática tem seus primeiros usos no cenário mundial para descrever, formular e resolver problemas em áreas do conhecimento como Engenharia e Ciências Econômicas. Entre os anos de 1966 e 1970 nos Estados Unidos, em trabalhos realizados pelo School Mathematics Study Group (SMSG) foram desenvolvidos modelos matemáticos com a finalidade de interpretar fenômenos naturais e sociais relacionados com o desenvolvimento humano.

De acordo com BIEMBENGUT e HEIN (2011) o desenvolvimento de modelos matemáticos está presente em praticamente todas as áreas do conhecimento, cujas formas de expressão são: equações algébricas, gráficos, programas de computador, fórmulas, representações geométricas, tabelas e diagramas, compreendendo a solução para o problema ou permitir a dedução de uma solução. Assim, a aplicação de modelagem matemática é um processo dinâmico que têm como objetivo principal, obter e validar modelos matemáticos formulados por meio de teorias, sendo uma forma de abstração e generalização matemática, para transformar sistemas dinâmicos em modelos matemáticos que possam representar um atributos em diferentes escalas (BASSANEZI, 2014).

2.2 Geometria fractal e multifractal

Por muito tempo trabalhou-se com Geometria Euclidiana, que foi criada por Euclides de Alexandria, por volta do ano 300 a.c. que buscava resolver os padrões matemáticos da natureza. No entanto, isso não foi capaz de resolver alguns problemas, como as representações de algumas estruturas presentes na natureza, como nuvens, relâmpagos, conformação física de algumas plantas, pois são atributos com elevada complexidade (ASSIS et al., 2008).

Na natureza são encontradas formas geométricas diversas, que são difíceis de se descrever por meio da geometria euclidiana tradicional, ou seja, por meio de linhas, círculos, esferas, etc.; essas formas são complexas e, portanto, requerem o uso da chamada geometria fractal ou geometria da natureza.

A geometria fractal faz parte do nosso ambiente e está presente em diferentes áreas da nossa vida, e geralmente passa despercebida sendo possível demonstrar a sua utilidade matematicamente (CANIEGO et al., 2001). A etimologia da palavra fractal vem do latim "*fractus*" que significa quebrado, fração que fala de uma nova geometria.

O termo fractal e suas teorias foram desenvolvidos por Mandelbrot, em 1975, que é considerado o pai da geometria fractal. No entanto, no século XIX já haviam trabalhos de alguns matemáticos como George Cantor e Helge Von Koch, que criaram objetos matemáticos chamados "monstros da matemática". Segundo Mandelbrot, o conceito de fractal está correlacionado com a dimensão (BARNSLEY e DEMKO, 1985), ou seja, a escala ou tamanho do atributo ou processo em estudo.

Portanto, fractal é um objeto que apresenta invariância em sua forma mesmo quando a escala em que este objeto está sendo analisado é alterada, ou seja, o objeto mantém sua "forma/padrão" original. Em outras palavras, alguns objetos não podem ser explicados pela matemática convencional, sendo necessário um arcabouço teórico que explique sua dimensão ou natureza, sendo então caracterizado por uma lei entre o número e tamanho dos objetos, a um expoente D , chamado de dimensão fractal (MANDELBROT, 1982).

A compreensão dos fractais permite entender a geometria de objetos que não estão relacionados na geometria clássica e estabelece modelos matemáticos para os estudos dos fenômenos naturais, e descreve a natureza em suas diferentes formas em níveis mais detalhados. Um fractal é um modelo no qual uma parte se assemelha ao todo, similaridade automática mantendo a forma que é independente da escala de ampliação obtida por um processo de repetição. Assim, os fractais podem ser definidos por três conceitos básicos: auto-similaridade, iteração e dimensão (CARVALHO, 2006).

Iteração, é a repetição da mesma ação ou princípio infinitamente as iterações na geometria fractal pode ser geométrica ou algébrica. (PEITGEN et al., 1992). A iteração geométrica é baseada na regra de fazer uma fratura em uma figura, sendo que nos estágios de fragmentação a regra será aplicada indefinidamente. A dimensão se refere ao valor da natureza de um atributo em comparação ao valor teórico de referência da geometria euclidiana.

A dimensão na geometria euclidiana, é definida como o número de parâmetros independentes necessários para uma descrição de seus pontos, ou seja, um ponto tem dimensão zero, uma linha, dimensão 1, área 2 e volume 3 (PEITGEN et al, 1992).

Na natureza existem formas que apresentam estruturas de auto-similaridade e que, embora não seja possível observar muitas escalas de ampliação, elas são entendidas do ponto de vista fractal. A noção de auto-similaridade deve ser entendida como aproximada (estatística) porque as partes têm a mesma estrutura, mas não são réplicas exatas. Isso não pode ser repetido indefinidamente, como pode ser feito em fractais gerados por processos matemáticos, como exemplo podemos citar a folha de muitas espécies de pteridófitas comumente chamadas de samambaias.

Assim, na natureza um objeto pode ser classificado como fractal se tiver: auto similaridade, complexidade e dimensão., podendo eles ser encontrados na natureza na forma de: flocos de neve, relâmpagos, plantas, animais e em diferentes processos dinâmicos que envolvem mais de um elemento natural, como a emissão de gases de efeito estufa pelo solo. Com isso, podem ser obtidos geometricamente ou aleatoriamente por processos repetitivos como, por exemplo: a curva de Koch (AGTERBERG et al., 1996) - (Figura 1).

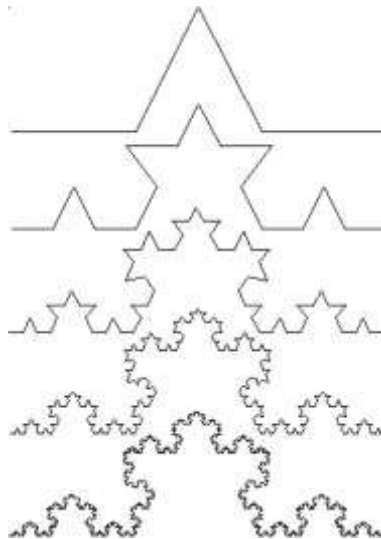


Figura 1. Representação da geometria da curva de Koch.

Para a geometria fractal, diferentemente da geometria euclidiana, não é necessário um valor inteiro. O fractal é um número fracionário que representa o grau de ocupação no espaço (GOUVÊA e MURARI, 2004). Partindo de um segmento de linha, que é dividido em três segmentos iguais, forma uma imagem triangular. Na sequência, aplicando

a mesma regra, a imagem formada é imediatamente igual às anteriores. Assim, repetindo o mesmo processo uma sucessão de infinitos comprimentos é obtida, o que Mandelbrot definiu como “infinito interno” (GOUVEA e MURARI, 2004).

A análise fractal permite uma caracterização satisfatória de objetos com estruturas. Entretanto, um objeto nem sempre é caracterizado em uma única escala. Nestes casos, a variável apresenta comportamento complexo, sendo representada por um conjunto de fractais, que é conceituado de teoria multifractal. A teoria multifractal permite uma avaliação quantitativa do fenômeno complexo em uma esfera espacial e temporal. Os padrões de multifractais são considerados mais apropriados para avaliar extrema variabilidade ao longo de múltiplas escalas (LOVEJOY e SHERTZER, 2007).

2.2.1 Aplicações da Geometria Fractal

A aplicação do conceito de geometria fractal têm sido trabalhado em diferentes áreas do conhecimento, como: medicina, biologia, química, física, artes plásticas, ciências ambientais, astronomia, cinematografia, como a economia baseada na descoberta de padrões sobre o comportamento das bolsas de valores, nas comunicações a tecnologia de construção de antenas na forma de fractais, para que, estas melhorem a capacidade de capturar várias bandas de frequência. Na Medicina, a estrutura de alguns órgãos segue a geometria fractal, como: a estrutura dos pulmões e os ramos dos neurônios. No ramo da biologia, podemos encontrar várias formas que seguem os padrões da geometria fractal, sendo sobretudo sistemas dinâmicos que apresentam evolução espacial e temporal (MANDELROT, 1998).

O solo por exemplo não pode ser entendido como um fractal perfeito, pois existe uma certa repetição de padrões em seus agregados, em sua estrutura, na superfície específica que se refere à auto-similaridade dentro de seus horizontes. O uso da teoria fractal visa modelar o solo da forma mais precisa possível, considerando isso com um fractal natural, buscando entender melhor os processos que interferem em sua dinâmica (PAZ FERREIRO et al, 2013).

2.2.2 Análise Multifractal

A análise multifractal é uma ferramenta matemática que permite caracterizar objetos ou sistemas complexos, por meio da sua decomposição em segmentos ou fragmentos de um todo, permitindo avaliar a sua estrutura e analisa as relações entre seus componentes.

A análise multifractal é realizada seguindo o método dos momentos (EVERTSZ & MANDELBROT, 1992). Inicialmente, uma malha com tamanho δ é empregada para se sobrepor sobre todo o suporte. Em outras palavras, o comprimento do corte transversal é dividido em segmentos menores com base na redução das escalas. A redução é realizada por meio de divisórias sucessivas do suporte, em k estágios ($k = 1, 2, 3 \dots$) que geram a cada escala δ , um número de segmentos, $N(\delta) = 2^k$ de comprimento tamanho característico, $\delta = L \times 2^k$, cobrindo toda a extensão do suporte, L , neste caso, um corte transversal (EVERTSZ & MANDELBROT, 1992; CANIEGO et al., 2005; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2013).

Em seguida, os dados experimentais para cada variável estudada são convertidas na distribuição de massa ao longo do suporte geométrico. Portanto, a probabilidade de função da massa $pi(\delta)$, para cada segmento é estimada como uma proporção de acordo com a Equação 1¹:

$$pi(\delta) = \frac{N_i(\delta)}{N_t} \quad (1)$$

Assim, a análise multifractal envolve várias funções de escala: massa exponencial, t_q , singularidade do espectro, $f(\alpha)$, índice de escala local, α_q , e generalizada ou dimensão Rényi, D_q . Na prática, a função de escalas com o tamanho do segmento segue a Equação 2²:

$$X(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} pi_i^q(\delta) \quad (2)$$

Posteriormente, um gráfico log-log da quantidade $X(q, \delta)$ versus δ para diferentes valores de rendimento: $X(q, \delta) \propto \delta^{-\tau(q)}$, onde t_q é a função de ordem de escala de

¹ onde $N_i(\delta)$ é o valor da medida em um determinado segmento, i^{th} , e N_t e a soma da medida em todo o transecto;

² Onde $n(\delta)$ é o número de segmentos com tamanho δ e momentos estatísticos q são definidos para $-\infty < q < \infty$;

massa q ; portanto, o método dos momentos é justificado se as parcelas de $X(q, \delta)$ versus δ são linhas retas (Halsey et al., 1986).

O expoente da função de massa t_q é então estimado a partir da função de partição (Equação 3)

$$t(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log X(q, \delta)}{\log(1/\delta)} \quad (3)$$

A função t_q controla como o momento de medida μ_i balanceia-se com q . Em geral, as medidas multifractais produzem uma função não-linear do t_q , ao passo que monofractal corresponde a linear t_q .

Para cada segmento, a probabilidade de distribuição é: $p_i(\delta) = \delta^{\alpha_i}$, onde α_i é a singularidade ou o expoente de Hölder de caracterização da densidade na i -ésima caixa (HALSEY et al., 1986). O expoente Hölder, dado por $\alpha^i = \log \mu_i(\delta) / \log \delta$, pode ser interpretado como um índice de aglomeração para o grau de concentração da medida, μ . É, de fato, o logaritmo de densidade da i -ésima caixa da partição do tamanho da característica δ .

Para as medidas distribuídas de multifractais, o número $N_\delta(\alpha)$ de células de tamanho δ tendo uma singularidade ou o expoente de Hölder igual a α aumenta para o decréscimo de δ e obedece uma lei poder: $N(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)}$, onde o expoente $f(\alpha)$ é uma função contínua de α . [O gráfico de $f(\alpha)$ versus α , chamado de espectro multifractal, tem, tipicamente, uma forma parabólica côncava para baixo, com um intervalo de α valores aumentando com o aumento da heterogeneidade da medida.] O expoente mínimo de escala $f(\alpha_{q-})$ corresponde à região mais concentrada da medida, e o expoente máximo expoente $f(\alpha_{q+})$ corresponde as regiões rarefeitas da medida. A ligação entre os expoentes de escala t_q e $f(\alpha)$ pode ser feita através de uma transformação de Legendre. No entanto, as funções t_q e $f(\alpha)$ são obtidos seguindo CHHABRA & JENSEN (1989) com as Equações 3a e 3b:

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_{i(q,\delta)} \log[\mu_i(\delta)]}{\log(\delta)} \quad (3a)$$

$$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_{i(q,\delta)} \log[\mu_i(q,\delta)]}{\log(\delta)} \quad (3b)$$

A função de escala, t_q , também está relacionado a dimensão de fractal generalizada (HENTSCHEL & PROCACCIA, 1983), que pode ser definido pelas equações 4a. De fato, o conceito de dimensão generalizada, D_q , corresponde ao expoente de escala para o q^{th} momento da medida. Além disso, a dimensão generalizada pode também ser definida pela Equação 4b. Observa-se, no entanto, que usando equações 4a ou 4b D_1 torna-se indeterminado porque o valor do denominador é zero. Portanto, para o particular caso em que $q = 1$, a equação 4c é usada.

$$D_1 = t(q)/(q - 1) \quad (4a)$$

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log[x(q,\delta)]}{\log \delta} \quad (4b)$$

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} X_i(1,\delta) \log[X_i(1,\delta)]}{\log \delta} \quad (4c)$$

Para um monofractal, D_q é uma função constante de q , então nenhuma informação adicional é obtida por meio da análise de momentos mais elevadas. No entanto, para medidas multifractais, a relação entre D_q e q não é constante. Neste caso, as dimensões generalizadas mais frequentemente usadas são D_0 para $q = 0$, D_1 para $q = 1$ e D_2 para $q = 2$, os quais são referidos como capacidade, informação (Entropia de Shannon) e dimensão de correlação, respectivamente.

A capacidade ou dimensão, D_0 , e o expoente de escala do número de segmentos não-vazios. Assim, é independente da quantidade de massa em cada caixa, mas leva em consideração o fato de que os segmentos são ocupados ou não. A dimensão de informação, D_1 , dá a probabilidade de ocupação do i -ésimo segmento de tamanho δ , sem levar em consideração a forma como a medida é distribuído dentro de cada um destes segmentos. Assim, D_1 fornece uma caracterização física, indicando como a heterogeneidade e alterada em um determinado intervalo de escalas, sendo também relacionada com a entropia de Shannon. A dimensão de correlação, D_2 , descreve a uniformidade dos valores de medida entre os intervalos. A dimensão generalizada, D_q , é amplamente usada para estudos abrangentes de multifractais. Diferenças entre D_q permitem a comparação da complexidade entre o conjunto estudado. Quanto maior a heterogeneidade da estrutura, mais próximo os valores D_q ; portanto em um monofractal D_q é constante.

2.3 REFERÊNCIAS

AGTERBERG, F. P.; CHENG, Q.; BROWN, A.; GOOD, D. Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba. **Computers & Geosciences**, v. 22, n.5, p. 497-507, 1996.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. ; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, **Soil Science Society of America**, p. 123-141, 1996.

ASSIS, T. A. D.; MIRANDA, J. G. V.; MOTA, F. D. B.; ANDRADE, R. F. S.; CASTILHO, C. M. C. D. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, 2008.

ATWELL, B. J. Response of roots to mechanical impedance. **Environmental and Experimental Botany**. 33(1): 27-40, 1993.

BARNESLEY, M. F.; DEMKO, S. Iterated function systems and the global construction of fractals. Proc. **R. Soc. Lond. A**, v. 399,p. 243-275, 1985

BASSANEZI, R, C. Modelagem matemática. Uma disciplina emergente nos programas de formação de professores. IX Biomatemática, Instituto de Matemática, Estatística e computação científica IMECC. p. 9-22, 2014 disponível em: <http://www.ime.unicamp.br>

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1793-1800, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C. & SILVA, A.P. Efeito da compactação na produtividade das cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **R. Bras. Ci. Solo**, 30: 787-794, 2006.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência a penetração e permeabilidades de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 167-177, 2001.

BIEMBENGUT, M. S.; HEIN, N. Modelagem Matemática no Ensino. 5. ed. São Paulo: Contexto, ISBN 978-85-7244-136-0, 2011.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C. E SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Rev. Ciênc. Agron*, v. 44, p. 1-9, 2013.

- CANARACHE, A. PENETR - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 16, p. 51-70, 1990.
- CANIEGO, F. J.; MARTÍN, M. A.; SAN JOSÉ, F. Singularity features of pore-size soil distribution: singularity strength analysis and entropy spectrum. *Fractals*, v. 9, n.3, p. 305-316, 2001.
- CANIEGO, F.J.; R. ESPEJO, M.A. MARTÍN,; F. SAN JOSÉ. 2005. Multifractal scaling of soil spatial variability. **Ecological Modelling**, v. 182.p. 291-302, 2005.
- CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v 33, p. 147-157, 2009.
- CARVALHO, G. J.; CARVALHO, M. D. P.; FREDDI, O. D. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 765-771, 2006.
- CHHABRA A.B.; JENSEN, R.V. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum, *Phys. Rev. Lett.*,v. 62,p. 1327-1330, 1989.
- EVERSTZ, C.J.G.; MANDELBROT, B.B. Multifractal measures. In Peitgen, H., H. Jürgens, and D. Saupe. *Chaos and Fractals*, Springer, Berlin,p. 921-953, 1992.
- GARCIA MORENO, R.; DIAZ; ALVAREZ, M. C.; TARQUIS, A. M.; PAZ GONZALEZ, A.; SAA REQUEJO, A. Shadow analysis of soil surface roughness compared to the chain set method and direct measurement of micro-relief, **Biogeosciences**,v. 7,p. 2477–2487, 2010
- GOMES, A.S.; SILVA, C.A.S.; PARFITT, J.M.B; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S. Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul. In: GOMES, A.S. et al. Embrapa Clima Temperado. Documentos, 169. Pelotas: Embrapa Clima Temperado,P. 40 , 2006.
- GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, C. R. F. S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras – MG. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35,p. 567-577, 2011.
- GOUVÊA, F. R.; MURARI, C. Fractais de bases caleidoscópicas. VIII Encontro Nacional de Educação Matemática, Recife,2004
- GUIMARÃES, R.M.L.; FENTON, O.; MURPHY, B.; TORMENA, C.A. Soil structure under adverse weather/climate conditions. In: Ball, B.C., Munkholm, L.J. (Eds.), *Visual Soil Evaluation: Realizing Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact*. CAB International, Wallingford, p. 15–30, 2015.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and tillage research**, v. 82, n.2, p. 121-145, 2005.

HENTSCHEL, H. G. E.; PROCACCIA, I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. **Physica D**, n. 8, p. 435–444, 1983.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 221-227, 2007.

LOVEJOY, S.; SCHERTZER, D. Scaling and multifractal fields in the solid earth and topography, *Nonlin. Processes Geophys*, n. 14, p. 465–502, 2007.

MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. 2 Ed. Londra: W. H. Freeman, 1982.

MANDELBROT, B.B. Fractality, lacunarity and the near-isotopic distribution of galaxies *Current Topics in Astrofundamental Physics*. Eds. N. Sanchez & A Zichichi. Dordrecht: Kluwer, p. 585-603,1998.

MELO FILHO, J. F. D.; SOUZA, A. L. V.; SOUZA, L. D. S. Determination of the subsurface quality index in a Cohesive Argisolic Yellow Latosol under natural forest in Coastal Plains. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n.6, p. 1599-1608, 2007.

PACHEPSKY, Y.; YAKOVCHENKO, V.; RABENHORST, M. C.; POOLEY, C.; SIKORA, L. J. Fractal parameters of pore surfaces as derived from micro micromorphological data: effect of long-term management practices, **Geoderma**, v. 74, p. 305- 319,1996.

PAZ FERREIRO, J.; MIRANDA, J. G. V.; VIDAL VÁZQUEZ, E. Multifractal analysis of soil porosity based on mercury injection and nitrogen adsorption. **Vadose Zone Journal**, v.9, p. 325-335, 2010.

PAZ-FERREIRO, J.; LUZ, L. R. Q. P.; da LADO, M.; VIDAL VÁZQUEZ, E. Specific surface area and multifractal parameters of associated nitrogen adsorption and desorption isotherms in soils from Santa Catarina, Brasil. **Vadose Zone Journal**, p.14, 2013,

PEITGEN, H. O.; JÜRGENS, H.; SAUPE, D. *Chaos and fractals: new frontiers of science*. **Springer**, Berlin, 1992.

PIGNATARO NETTO, I. T.; KATO, E.; GOEDERT, W. J. Atributos físicos e químicos de um latossolo vermelho-amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. **R. Bras. Ci. Solo**, . v33, p. 1441-1448, 2009.

PIRES DA SILVA, A.; S. Inhoff and M. Corsi. Evaluation of soil compaction in an irrigated short grazing system. **Soil and Tillage Research**, v. 70(1), p. 83-90, 2003.

RAPER, R. L., E. B.; SCHWAB, K. S.; BALKCOM, C. H.; BURMESTER, D.; REEVES W. Effect of annual, biennial, and triennial in-row subsoiling on soil compaction and cotton yield in southeastern U.S. silt loam soil. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 21(3), p. 337-343. 2005.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

SARTORI, G. M. S.; MARCHESAN, E.; DAVID, R. D.; DONATO, G.; COELHO, L. L.; AIRES, N. P.; ARAMBURU, B. B. Soil tillage systems and seeding on grain yield of soybean in lowland area. *Ciência Rural*;v. 46(3),p. 492-498, 2016

SECCO, D. Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas. 108f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, 2003.

SENE, M.; VEPRASKAS, M.J.; NADERMAN, G.C.; DENTON, H.P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 49,p. 422-427, 1985.

SILVA, A. P.; D. KAY B. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil*,v. 184(2),p. 323-329, 1996.

SILVA, M. A. S. D.; MAFRA, Á. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciencia Rural*. Santa Maria, v. 35, n. 3 , p. 544-552, 2005.

SILVA, W. M. D.; BIANCHINI, A.; CUNHA, C. A. D. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. *Engenharia Agrícola*,v. 36(3),p. 449-459. 2016.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; MONTENEGRO, A. A. A.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ-FERREIRO, J. Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 20, p. 529-541, 2013.

SOUZA, E.B.; HONORATO, A.C.; PIMENTA, W.A.; CHAVES, R.G.; CORTEZ, J.W. Malhas amostrais para caracterização espacial da resistência do solo à penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – ConBAP, 6., 2014, São Pedro/SP. Anais. São Pedro/SP, 2014.

STONE, L. F.; FERREIRA, E. P.B.; DIDONET, A. D.; HEINEMANN, A. B.; OLIVEIRA, J. P. Correlação entre a produtividade do feijoeiro no sistema de produção orgânica e atributos do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 17,p. 19–25, 2013.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 42,p. 1159-1167, 2007.

TARQUIS, A. M.; GIMÉNEZ, D.; SAA, A.; DÍAZ, M. C.; GASCÓ, J. M.; PACHEPSKY, J.; SELIM, H. M. Scaling and multiscaling of soil pore systems determined by image analysis. Scaling methods in soil physics. **CRC Press**, Boca Raton, FL, 19-34.2003.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; SIMÕES NETO, D. E.; PEDROSA, E. M.; MAGALHÃES, A. G.; SILVA, Ê. F. D. F. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p. 752-757, 2017

TAYLOR, H. M. Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K. K., org. compaction of agricultural soils. Madison, **American Society of Agricultural Engineers**, P. 292-305, 1971.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium-to-coarse-textured soil materials. **Soil Sci**,v. 102,p. 18-22, 1966.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 59, p. 795 801, 2002

VIDAL VAZQUEZ, E.; GARCIA MORENO, R.; MIRANDA, J. G. V.; DIAZ, M. C.; SAA REQUEJO, A.; PAZ FERREIRO, J.; TARQUIS, A. M. Assessing soil surface roughness decay during simulated rainfall by multifractal analysis, **Nonlin. Processes Geophys.**,v.15,p. 457–468, 2008.

VIDAL VAZQUEZ, E.; MIRANDA, J. G. V.; PAZ GONZALEZ, A. Describing soil surface microrelief by crossover length and fractal dimension, **Nonlin. Processes Geophys.**,v. 14,p. 223–235, 2007.

VIDAL VAZQUEZ, E.; VIVAS MIRANDA, J. G. V.; PAZ GONZALEZ, A. Characterizing isotropy and heterogeneity of microtopographic soil surfaces using fractal models, **Ecol. Model.**, 182,p. 337–353, 2005.

VIDAL-VÁZQUEZ, E.; CAMARGO, O. A.; VIEIRA, S. R.; MIRANDA, J. G. V.; MENK, J. R. F.; SIQUEIRA, G. M.; GONZÁLEZ, A. P. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. **Vadose Zone Journal**, v, 12(3). 2013.

VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; SIQUEIRA, G. M. & DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**,v. 70,p. 185-195, 2011

WILSON, M. G.; MIRÁS-AVALOS, J. M.; LADO, M.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at varying water contents. **Vadose Zone Journal**, v.15, 2016.

3 HIPÓTESE E OBJETIVOS

3.1 HIPÓTESES

A prática da agricultura de precisão requer o conhecimento de diferentes atributos do solo e sua relação com a produtividade dos cultivos, permitindo o delineamento de zonas de manejo específico. No entanto, os diferentes atributos biológicos, físicos e químicos do solo possuem variação na paisagem em escalas diversas, por esta razão uma caracterização eficiente dos atributos do solo, é aquela que represente atributos dinâmicos, ou seja, é aquela que estude um atributo que seja correlacionado com um ou mais atributos do solo. Desta maneira, o estudo da resistência do solo à penetração permite inferir sobre o estado de compactação de um solo, que por sua vez está relacionado com a pedoforma, conteúdo de água no solo, conteúdo de argila, etc. Assim, a hipótese deste trabalho compreende:

- a) A resistência do solo à penetração apresenta continuidade ao longo da paisagem pode ser caracterizada como um fenômeno fractal ou multifractal;
- b) As variações da pedoforma influenciam a fractalidade da resistência do solo à penetração em diferentes escalas.

3.2 OBJETIVO GERAL

Objetiva-se com este trabalho avaliar a resistência do solo à penetração por meio de técnicas fractais e multifractais em áreas de cultivo com cana-de-açúcar e soja.

3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a ocorrência de distintos padrões de resistência do solo à penetração nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar e soja;

- Avaliar a multifractalidade de perfis verticais de resistência do solo à penetração, determinando-se padrões em escalas que os métodos convencionais de análise de solo não são capazes de detectar.
- Determinar zonas de manejo específicas por meio do uso de modelos matemáticos complexos que compreendam a variabilidade horizontal e vertical da resistência do solo à penetração.

ÍNDICE DE ARTIGOS

4 ANÁLISE MULTIFRACTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇUCAR.....29

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – ISSN: 1807-1929

Qualis em biotecnologia B3

Qualis em biodiversidade B3

Qualis em ciências agrárias B1

Artigo aceito para publicação 8/09/2018 conforme carta de aceite apresentada no anexo

5 PADRÕES MULTIFRACTAIS DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM DIFERENTES PEDOFORMAS.....46

Revista Engenharia Agrícola – ISSN: 1809-4430

Qualis em biotecnologia B4

Qualis em biodiversidade B4

Qualis em ciências agrárias B1

4 MULTIFRACTAL ANALYSIS OF THE RESISTANCE OF SOIL TO PENETRATION UNDER CULTIVATION OF SUGARCANE

Abstract: The objective of this work was to analyze the resistance of soil to penetration under cultivation of sugarcane, by means of multifractal and geostatistical modeling. The experimental plot has 6.85 ha, and is located in Coelho Neto (Maranhão, Brazil). In the area, 60 sampling points were evaluated in order to measure the resistance of soil to penetration in the 0-0.6 m depth layer every 0.01 m. Multifractal analysis was performed considering the scale property, the generalized dimension and the singularity spectrum. Geostatistics was used to map the penetration resistance and multifractal parameters. Four distribution patterns of penetration resistance were identified. The average soil penetration resistance ranged from 0.594 MPa to 4 277 MPa. The graph of the partition function presented adjustments larger than 0.9, with strong scales for the order moments q [-5, 5]. The generalized dimension showed that the vertical profiles of PR in the relief unit Type B, are the most heterogeneous. The use of geostatistics and multifractal analysis allowed the identification of zones of homogeneous management of PR considering the variation of relief. RP_{maximum} and PR_{D-5-D5} allowed the delimitation of two management zones.

Key words: fractal geometry, dimension fractal, singularity spectrum, geostatistics, soil management

INTRODUCTION

Fractal and multifractal models can describe the complexity of the processes that determine the characteristics of soil (Halsey et al., 1986; Caniego et al., 2006). According to Evertsz & Mandelbrot (1992), a monofractal is described by a simple scale, while a

multifractal involves a continuous spectrum of scale exponents, which are related to complex processes with different levels of intensity. According to Banerjee et al. (2011), a multifractal analysis reveals more information about data heterogeneity than other spatial techniques.

In this sense, the study of soil compaction should consider mathematical models that take into account the variation of soil, even at small scales. The degree of compaction of soil can be characterized by measuring its resistance to penetration (PR, MPa), due to its dynamic and the interaction with other soil properties, such as: soil composition, structure, bulk density, soil porosity and water content (Lipiec & Hatano, 2003; Siqueira et al. 2015; Lima et al., 2017; Tavares et al., 2017). While studying a PR in parallel transects Folorunso et al. (1994) reported that fractal analysis allowed a qualitative discrimination of soils, despite the small variations across scales. Roisin (2007) found that the management of soil influenced the PR multifractality. Siqueira et al. (2013) used multifractal and geostatistics techniques in order to study vertical profiles of PR and concluded that PR has variability in vertical and horizontal scale. Studying the effect of soil bulk density and water potential over the PR multifractality, Paz Ferreiro et al. (2013) found that the increasing of bulk density caused the decrease of PR multifractality. Using techniques of multifractal analysis for the study of PR due the increase of water deficit Wilson et al. (2016) observed that the values of PR become more heterogeneous with the decreasing of water content in soil.

Thus, the aim of this study was to: a) analyze the vertical profiles of PR in an area under cultivation of sugarcane, by means of multifractal techniques; b) verify if the multifractality of PR vertical profiles is influenced by the relief; c) and to characterize the spatial variability of PR and multifractal parameters.

MATERIAL AND METHODS

The study area is located at the Itajubara Mill in the municipality of Coelho Neto, State of Maranhão, Brazil (latitude 04 ° 19'05 " S and longitude 43 ° 00'22 " W, with an average elevation of 71 m). The experimental area has 6.85 ha, and has been cultivated since 2014 with sugarcane (*Saccharum officinarum* sp.), variety RB92579. The soil of the area is classified as a Xanthic Ferralsol (FAO, 1994).

A total of 60 random sampling points were demarcated in the experimental area to determine the soil PR (MPa), and they were classified into four relief units (Figure 1 A): Type A, >74 m; Type B, from 71 to 74 m; Type C, from 68 to 71 m; and Type D, from 65 to 68 m.

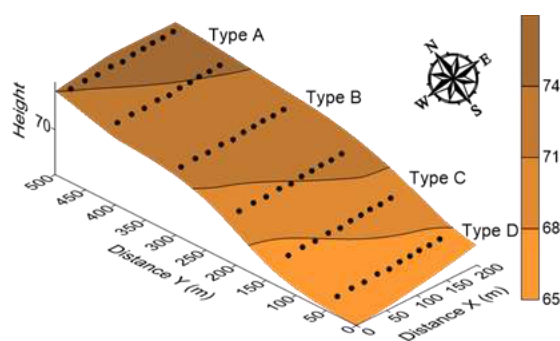


Figure 1. Topographic map and sampling scheme of 60 sampling points and relief units (Type A, B, C and D)

The soil PR (MPa) was measured using a impact penetrometer with a 0.0125-m diameter steel cone and a 30° angle. PR samplings were performed on 04/22/2016 with soil at field capacity ($\theta = 0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), which was determined in the laboratory by placing the samples in soil retaining rings in a Richards pressure plate apparatus. The PR values were determined in the 0-0.6 m depth layer at every 0.01 m and 60 vertical profiles of PR were generated.

The main statistical moments were determined using Software R 3.3.1 software (R Core Team, 2017). The multifractal analysis was performed using the method of moments to obtain multiple PR scales, and successive partitioning generated at each scale a number of segments $N(\delta) = 2^k$ with a characteristic size length $\delta = L \times 2^k$ (Evertsz & Mandelbrot, 1992; Caniego et al., 2006; Vidal Vazquez et al., 2013).

The expression of the data as a function of mass $p_i(\delta)$ was determined according to Eq. 1 and the size of the segments given by Eq. 2.

$$p_i(\delta) = \frac{N_i(\delta)}{N_t} \quad (1)$$

$$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} p_i^q(\delta) \quad (2)$$

Where:

$N_i(\delta)$ is the value of the measure in a given segment i ;

N_t is the sum of the measure in the whole transect, and;

$N(\delta)$ is the number of segments with size δ . Statistical moment q is defined for $-\infty < q < \infty$.

To estimate the exponent of mass function, τ_q , the partition function was used following Eq. 3, and the distribution probability is given by $p_i(\delta) = \delta^{\alpha_i}$, where α_i is the singularity or Hölder exponent characterizing density in the i^{th} box (Halsey et al., 1986). In turn, the Hölder exponent is calculated by $\alpha^i = \log \mu_i(\delta) / \log \delta$, which can be used to evaluate the degree of concentration of the measure μ .

$$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \chi(q, \delta)}{\log \left(\frac{1}{\delta} \right)} \quad (3)$$

The relation between the exponent τ_q and $f(\alpha)$ can be obtained by means of the Legendre transformation. However, the Legendre transformation in some situations is unsatisfactory, mainly associated to errors in the estimation of $f(\alpha)$. Thus, in the present study, τ_q and $f(\alpha)$ were estimated using the direct method of Chhabra & Jensen (1989) using Eqs. 4 and 5.

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(\delta)]}{\log(\delta)} \quad (4)$$

$$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(q, \delta)]}{\log(\delta)} \quad (5)$$

The generalized dimension was defined by Eq. 6, where D_1 becomes indeterminate because the denominator value is zero. Therefore, for the particular case where $q = 1$, Eq. 7 is used.

$$D_q = \tau(q)/(q - 1) \quad (6)$$

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \chi_i(1, \delta) \log[\mu_i(1, \delta)]}{\log \delta} \quad (7)$$

For a monofractal, D_q is a constant function of q , and for multifractals, the relationship between D_q and q is not constant.

The geostatistical analysis was performed considering the intrinsic hypothesis and adjustment of the semivariograms. The Surfer 11 software (Golden Software, 2014) was used to construct the isolines maps of soil resistance to penetration and multifractal parameters.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 (A, B, C and D) shows the plots of PR for the vertical profiles in the different relief units: Type A (profiles 2, 7, 10 and 21), Type B (profiles 11, 13, 16 and 26), Type C (profiles 18, 22, 25 and 27) and Type D (profiles 28, 41, 47 and 60). The PR pattern is similar in the Type A, B and C relief units, with PR increasing to depths of 0.3 (Type B) and 0.4 m (Type A and C) and then decreasing to a depth of 0.6 m. Lima et al. (2017) and Tavares et al. (2017) indicated that PR is influenced by the clay content and bulk density, which in turn are correlated with the volumetric content of water. In this sense, the greater homogeneity of PR with depth in the Type D relief unit is related to the dynamic of water in soil since this relief unit displays the lowest altimetry values (between 65 and 68 m).

Figure 2E shows the mean and standard deviation values for the PR (MPa) of the vertical profiles in the 0-0.6 m layer. The increase in the standard deviation with depth is due to the fact that soil management under sugarcane favors the homogenization of the surface layer as reported by Tavares et al. (2017). The plot shows that the lowest PR value is 0.594 MPa and the highest value is 4.277 MPa. Several authors reported that PR values greater than 2 MPa are limiting for the development of sugarcane crops (Otto et al., 2011; Sá et al., 2016). However, Gonçalves et al. (2014) reported a value of 2.5 MPa as limiting, Souza et al. (2015) reported a value of 3.0 MPa as limiting, and Vepraskas & Miner (1986) reported values ranging from 2.8 to 3.2 MPa as limiting for most crops.

The statistical analysis (Table 1), showed that the lowest mean of PR is found in profile 18 (PR = 1.794 MPa) and the highest value is found in profile 13 (PR = 2.673 MPa) in the Type C and B relief units, respectively. Sá et al. (2016) studied limiting PR values for the development of sugarcane and reported values of 3.8 MPa as limiting for the growth of the crop. For the present study, the PR values in the representative profiles of each relief

unit (Table 1 and Figure 2) are below 3.8 MPa. Lipiec & Hatano (2003) suggested that PR values greater than 4 MP stopped the root development of sugarcane crop. However, Siqueira et al. (2013) found that in the field under favorable moisture conditions, root development is not compromised, even with high PR values.

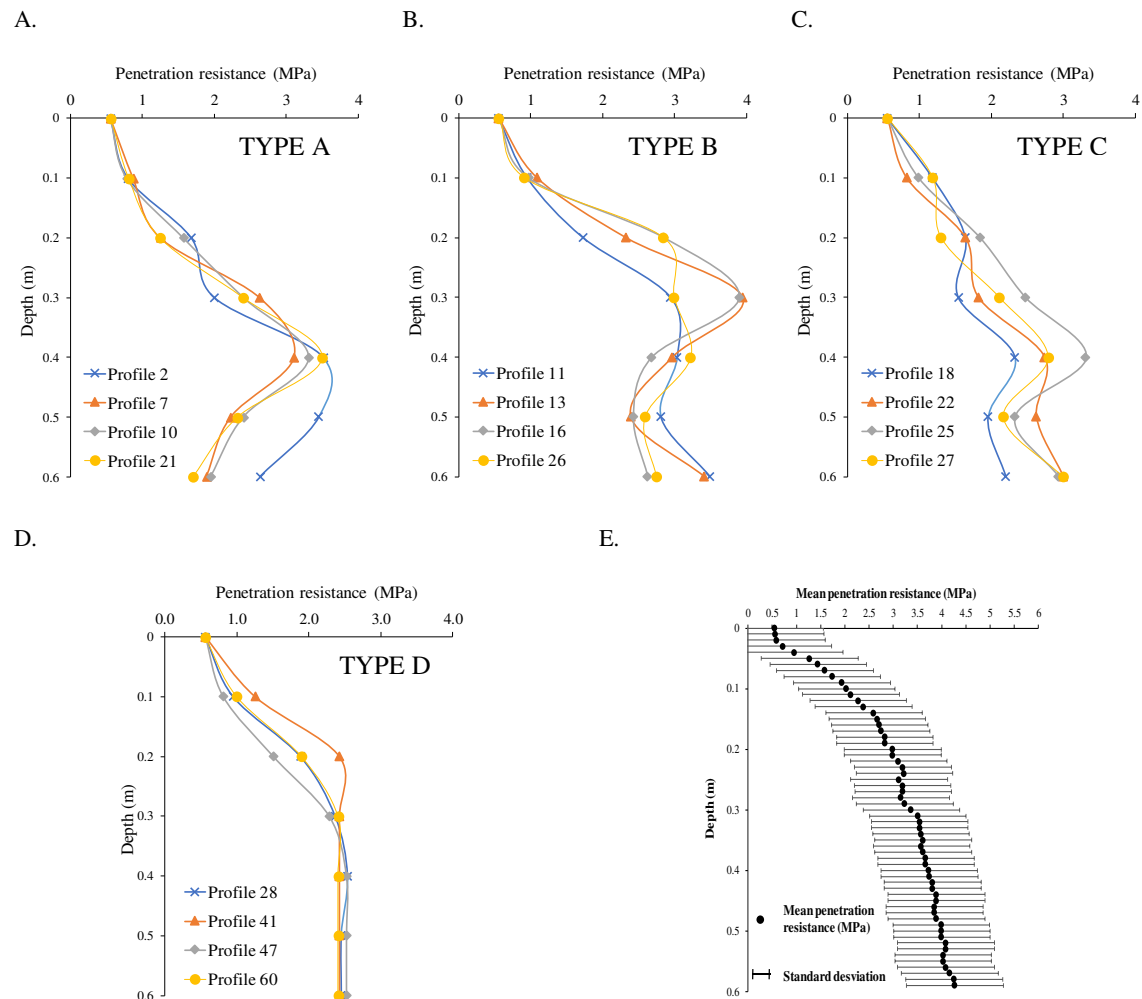


Figure 2. Vertical profiles of PR in the 0-0.6 m depth layer for the different relief units (Type A, B, C and D) and mean and standard deviation for the 60 vertical profiles of PR (E) in the study area under sugarcane

The values of skewness, kurtosis and D indicate that eight profiles presented normal frequency distributions (profiles 2, 7, 10, 13, 16, 22, 25 and 27) and 8 profiles presented lognormal frequency distributions (profiles 21, 11, 26, 18, 28, 41, 47 and 60). Siqueira et al.

(2013) and Tavares et al. (2017) indicated that the high variation of PR data is due to the high variability of PR values throughout the landscape.

Table 1. Descriptive statistic for the representative profiles of soil penetration resistance in the four relief units

	----- Type A -----				----- Type B -----				----- Type C -----				----- Type D -----			
	2	7	10	21	11	13	16	26	18	22	25	27	28	41	47	60
Mean	2.39	1.98	2.05	1.92	2.46	2.67	2.37	2.52	1.79	1.93	2.28	1.83	2.03	1.94	2.00	1.94
SD	1.07	0.89	0.91	0.74	0.98	1.12	1.24	0.98	0.51	0.75	0.86	0.79	0.65	0.46	0.75	0.46
CV	44.90	45.13	44.12	38.60	39.72	42.00	52.57	38.68	28.66	39.15	37.76	43.31	32.16	23.90	37.39	23.90
Skew	0.38	0.27	0.24	-0.33	-0.46	0.10	0.44	-0.34	-0.51	-0.09	-0.34	0.08	-0.85	-2.74	-1.02	-2.74
Kurt	-0.36	-0.73	-0.10	-0.69	-0.71	-0.16	-0.57	1.22	1.34	-0.45	-0.25	-1.01	-0.10	5.67	-0.55	5.67
D*	0.15n	0.18n	0.11n	0.21Ln	0.26Ln	0.11n	0.18n	0.21Ln	0.23Ln	0.12n	0.13n	0.15n	0.24Ln	0.53Ln	0.37Ln	0.53Ln

SD - Standard deviation; CV - Coefficient of variation; Skew: Skewness; Kurt - Kurtosis; D - Maximum deviation related to the normal frequency distribution by the Kolmogorov-Smirnov test, with a probability of 1% error

The partition functions were constructed for successive segments of different sizes, i.e., 2^k , with $k = 0$ to $k = 5$, and moments in the interval $q = +5$ to $q = -5$. Figure 3 (A and B) presents the partition functions of the profiles 22 (Type C) and 60 (Type D), the graphs that presented the best ($R^2 = 0.99993$) and the worst ($R^2 = 0.99615$) by the coefficient of determination (R^2). According to Siqueira et al. (2018), the occurrence of coefficient of determination (R^2) greater than 0.9, describe strong scales for the moments of order q [-5, 5]. Thus, the data obey a power law characterizing multifractal scales, as described by Banerjee et al. (2011). Vidal Vázquez et al. (2013) describe that the presence of multiple scales describes a multifractal, while single scales are characterized as monofractal.

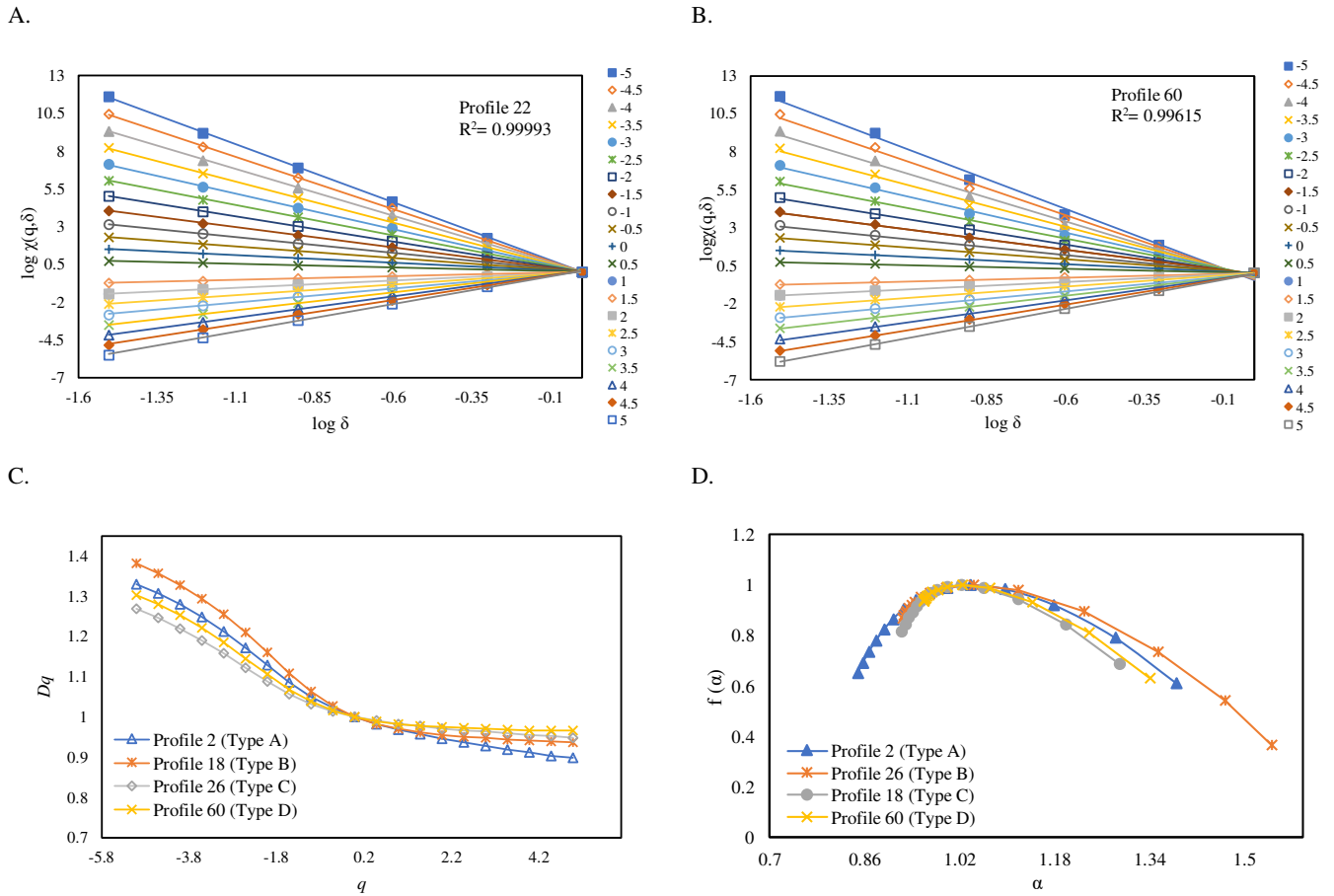


Figure 3. Partition function (A and B), generalized dimension (C) and the singularity spectrum (D) of soil resistance to penetration data

Table 2 presents the multifractal dimensions for RP in the dimensions (D_{-5} - D_5 , D_{-5} , D_5 , D_0 , D_1 and D_2). The generalized dimensions (Figure 3C and Table 2) varied between profiles, expressing greater heterogeneity for profile 2 in type A (D_{-5} - $D_5 = 0.432$), type 13 in type B (D_{-5} - $D_5 = 0.496$), profile 25 in type C (D_{-5} - $D_5 = 0.404$) and profile 47 in type D (D_{-5} - $D_5 = 0.367$). For the capacity dimension (D_0), the values were constant for all profiles in the four types ($D_0 = 1,000$). The dimension D_1 or entropy dimension obtained the largest dimension values for the profiles 21 ($D_1 = 0.972 \pm 0.003$), 26 ($D_1 = 0.970 \pm 0.002$), 18 ($D_1 = 0.982 \pm 0.001$), 41 and 60 ($D_1 = 0.983 \pm 0.002$) in types A, B, C and D respectively.

Table 2. Multifractal parameters obtained from the generalized dimension (D_{-5} - D_5 , D_{-5} , D_5 , D_0 , D_1 and D_2) and the singularity spectra (q_+ , q_- , α_0 , α_{\max} and α_{\min}).

Profile	D_{-5} - D_5	D_{-5}	D_5	D_0	D_1	D_2	q_+	q_-	α_0	α_{\max}	α_{\min}
Type A											
2	0.432	0.897±0.019	1.330±0.047	1.000±0.000	0.969±0.004	0.946±0.009	5.000	-2.000	1.038±0.005	1.386±0.075	0.848±0.036
7	0.373	0.895±0.013	1.268±0.032	1.000±0.000	0.964±0.004	0.938±0.007	5.000	-3.000	1.042±0.005	1.409±0.067	0.855±0.024
10	0.417	0.894±0.016	1.311±0.027	1.000±0.000	0.965±0.004	0.941±0.008	5.000	-3.500	1.044±0.006	1.507±0.054	0.844±0.030
21	0.354	0.930±0.010	1.284±0.012	1.000±0.000	0.972±0.003	0.956±0.005	5.000	-4.500	1.036±0.004	1.509±0.024	0.906±0.020
Type B											
11	0.424	0.923±0.012	1.347±0.021	1.000±0.000	0.968±0.003	0.950±0.006	5.000	-3.000	1.042±0.005	1.542±0.021	0.898±0.024
13	0.496	0.892±0.009	1.388±0.038	1.000±0.000	0.965±0.003	0.940±0.006	5.000	-2.000	1.045±0.005	1.471±0.038	0.842±0.016
16	0.491	0.866±0.013	1.356±0.032	1.000±0.000	0.953±0.009	0.920±0.018	5.000	-2.500	1.056±0.011	1.492±0.032	0.818±0.052
26	0.444	0.938±0.007	1.381±0.032	1.000±0.000	0.970±0.002	0.955±0.004	5.000	-2.500	1.043±0.004	1.546±0.052	0.924±0.011
Type C											
18	0.319	0.949±0.006	1.268±0.055	1.000±0.000	0.982±0.001	0.971±0.002	5.000	-2.000	1.023±0.003	1.289±0.078	0.922±0.015
22	0.361	0.922±0.014	1.283±0.007	1.000±0.000	0.973±0.004	0.956±0.007	5.000	-5.000	1.034±0.005	1.519±0.015	0.885±0.027
25	0.404	0.931±0.011	1.335±0.017	1.000±0.000	0.972±0.002	0.956±0.005	5.000	-3.000	1.038±0.002	1.527±0.039	0.910±0.022
27	0.394	0.904±0.009	1.298±0.040	1.000±0.000	0.964±0.001	0.941±0.001	5.000	-2.500	1.044±0.003	1.408±0.075	0.874±0.023
Type D											
28	0.359	0.944±0.009	1.304±0.029	1.000±0.000	0.977±0.003	0.963±0.005	5.000	-2.500	1.031±0.004	1.427±0.058	0.928±0.015
41	0.338	0.965±0.001	1.303±0.057	1.000±0.000	0.983±0.002	0.974±0.002	5.000	-2.000	1.025±0.004	1.342±0.089	0.959±0.001
47	0.367	0.944±0.013	1.311±0.030	1.000±0.000	0.973±0.003	0.959±0.006	5.000	-3.000	1.037±0.004	1.484±0.062	0.933±0.025
60	0.338	0.965±0.001	1.303±0.057	1.000±0.000	0.983±0.002	0.974±0.002	5.000	-2.000	1.025±0.004	1.342±0.089	0.959±0.001

The variation in the dimension values D_q (D_{-5} - D_5) is used to determine the multifractality or heterogeneity of the data (Paz Ferreiro et al., 2010; Dafonte Dafonte et al., 2015; Wilson et al., 2015). For the present study, the vertical profiles of PR [Profile 11 (D_{-5} - D_5 = 0.424), 13 (D_{-5} - D_5 = 0.496), 16 (D_{-5} - D_5 = 0.444)] in the Type B relief unit are more heterogeneous when comparing the profiles of relief units Type A, C and D (Table 2). The multifractal description of PR data on the Type B relief unit is important information, as this relief unit represents 3.27 ha or 47.73% of the study area, so this information can be used for the design of specific management areas using the multifractal parameters.

The values of α and $f(\alpha)$ for the singularity spectra of the four patterns were calculated for the moment q , whose r^2 values are greater than 0.90. For the four relief units (Type A, B, C and D), the q_+ was constant (-5) and q_- ranged from -2 to -5 among the profiles (Table 2).

Figure 3D shows the singularity spectra for the PR profiles (Type A, B, C and D). The singularity spectra have a parabola shape with variation in the skewness of the branches. According to Dafonte et al. (2015), Paz Ferreiro et al. (2018) and Siqueira et al. (2018), the skewness of the spectra is indicative of the dominance of outliers in the data. The CV values (Table 1) confirm the high variability of the data for the present study. The singularity spectra (Figure 3D) are broad and stretched to the right for all analyzed profiles, however, with small variations in type D. The width and amplitude ($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) of the singularity spectra for the RP profiles varied in the different relief units (Table 2).

Values of α_{\max} were higher for profile 21 ($\alpha_{\max} = 1.509$, type A), profile 26 ($\alpha_{\max} = 1,546$, type B), profile 25 ($\alpha_{\max} = 1,527$, type C) and profile 47 ($\alpha_{\max} = 1.484$, type D). For the values of α_{\min} , the lowest values corresponded to profiles 10 ($\alpha_{\min} = 0.844$, type A), profile 16 ($\alpha_{\min} = 0.818$, type B), profile 27 ($\alpha_{\min} = 0.874$, type C), profile 28 0.928, type D). Variations in the width (α_{\min}) and range (α_{\max}) of the singularity spectra (Table 2) are indicative of heterogeneity because these parameters provide information about the variability of values in the measured scales (Vidal Vázquez et al., 2010; 2013; Wilson et al., 2016; Paz Ferreiro et al., 2018). The wider the $f(\alpha)$ - α spectrum, the higher the heterogeneity in the local scaling indices of the variable study and vice versa (Siqueira et al., 2018).

Figure 4 shows the spatial distribution maps and the adjustments and models of the semivariogram for the mean and maximum PR at depths of 0-0.6 m as well as the parameters PR_{D-5-D5} , $PR_{\alpha 0-\alpha 5}$ and Hurst exponent (H), constructed via ordinary kriging. The exponential model was the one that fit the data set (Figure 4), except for the RP_{maximum} that adjusted to the gaussian model, which can be justified by its range value ($a = 32$ m). is less than the range of RP_{mean} ($a = 38.7$ m), indicating that RP_{maximum} values are more heterogeneous in the study area, whereas RP_{mean} values vary in a smaller scale in the study area. The

parameters PR_{D-5-D5} , $PR_{\alpha 0-\alpha 5}$ and Hurst exponent (H) presented range values of 41, 31.7 and 41 m, respectively.

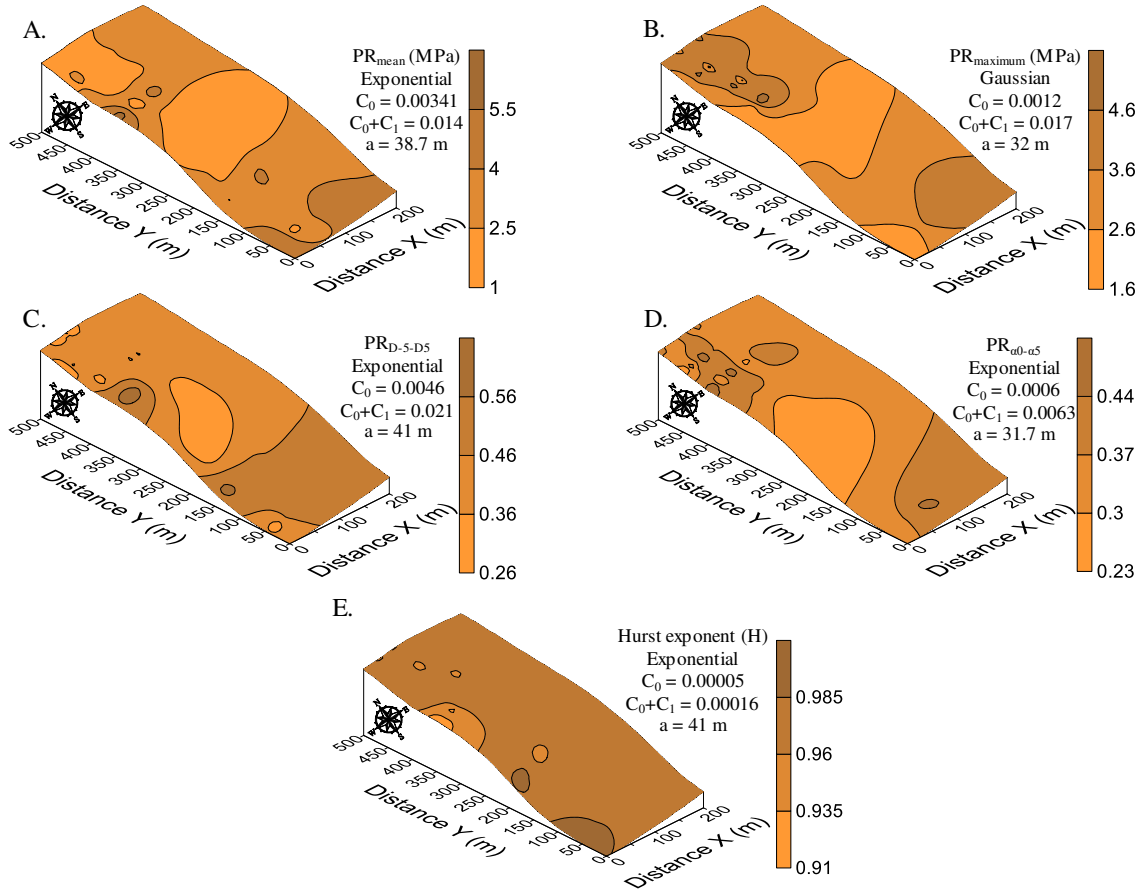


Figure 4. Spatial variability maps for the mean and maximum PR at depths of 0-0.6 m as well as the parameters PR_{D-5-D5} , $PR_{\alpha 0-\alpha 5}$ and Hurst exponent (H)

The spatial variability maps for the mean and maximum PR demonstrate an inverse relationship between the maps of the PR_{D-5-D5} , $PR_{\alpha 0-\alpha 5}$ and Hurst exponent (H) parameters. In this sense, linear correlations were calculated for all the parameters involved in spatial analysis, in order to confirm the spatial pattern of the contour lines. Positive correlations are described for $PR_{mean} \times PR_{maximum}$ ($|r| = 0.565$), $PR_{D-5-D5} \times PR_{\alpha 0-\alpha 5}$ ($|r| = 0.486$), $PR_{maximum} \times PR_{\alpha 0-\alpha 5}$ ($|r| = 0.333$). Negative or inversely proportional correlations are described between $PR_{D-5-D5} \times$ Hurst exponent (H) ($|r| = -0.498$), $PR_{\alpha 0-\alpha 5} \times$ Hurst exponent (H) ($|r| = -0.183$) and $PR_{mean} \times$ Hurst exponent (H) ($|r| = -0.102$). The negative correlations between Hurst

exponent (H) x PR_{mean} reported in the present study, corroborate with Siqueira et al. (2013) that in a study of the multifractality of vertical profiles of RP described a negative correlation between Hurst exponent (H) x PR_{mean} ($|r| = -0.316$).

The maps of spatial variability for mean and maximum PR at depths of 0-0.6 m (Figure 4A and B) have a pattern of distribution of contour lines similar to the map of development (Figure 1), allowing to justify and understand the presence of more values elevated mean and CV (%) for the relief unit Type B (Table 1), when compared to the other relief units. As described previously, the Type B relief unit presented the highest multifractality of the data according to Figure 3C and Table 2, showing the highest values of D_q (D_{-5} - D_5). Demonstrating that the delimitation of management zones can be performed considering the relief units. In this sense, the spatial variability map for PR_{D-5-D5} (Figure 4C) allows to describe two management zones, one in the upper part of the area with Type A and B units, and another in the lower part covering Type C units and D.

The map of $PR_{\alpha 0-\alpha 5}$ (Figure 4D), allows the delimitation of two specific management zones, following the same pattern presented by PR_{D-5-D5} (Figure 4C), with two specific management zones, which mainly follow the contour map PR_{maximum} (Figure 4B), corroborating with Siqueira et al. (2013) that in the study of the multifractality of vertical RP profiles found the same pattern of distribution. The relation of the spatial variability maps of PR_{maximum} and $PR_{\alpha 0-\alpha 5}$ (Figure 4B and D) confirms the values of positive linear correlation described for these attributes ($|r| = 0.333$). The incorporation of the knowledge of PR_{maximum} modeled by means of geostatistical tools and multifractal analysis still allows to infer about the state of soil compaction. In this sense, it is verified that most of the study area presents values of RP_{maximum} of approximately 3.6 MPa, with no problems of soil compaction, corroborating with the studies of Lipiec & Hatano (2003), Vaz et al. (2011), Sá et al. (2016), Lima et al. (2017) and Tavares et al. (2017).

The spatial pattern of the Hurst exponent (Figure 4E) in the study area was greater than 0.91. The values of the Hurst exponent describe the persistent or anti-persistent of a series following a law of scale. Thus, the spatial variability map of the Hurst exponent describes the multifractality and non-randomness of the vertical profiles of RP, demonstrating that it is independent of the relief unit the RP measured with impact penetrometer in the 0-0.6 m depth layer is autocorrelated.

CONCLUSIONS

1. The vertical profiles of PR in the 0-0.6 m depth layer at every 0.01 m showed multifractal behavior represented by the singularity spectrum (α) versus $f(\alpha)$ and the generalized dimension (D_q).

2. The vertical profiles of PR in the Typo B relief unit showed greater heterogeneity of the D_q (D_{-5} - D_5) dimension compared to the other relief units (Type A, C and D), demonstrating greater multifractality of the RP series.

3. The use of geostatistics and multifractal analysis allowed the identification of zones of homogeneous management of PR considering the variation of relief. RP_{maximum} and $PR_{D_{-5}-D_5}$ allowed the delimitation of two management zones.

ACKNOWLEDGMENT

Authors acknowledge to Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA - UNIVERSAL-001160/17 and BD-

02105/17). This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001". Thanks also to Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Process 429354/2016-9, 307619/2016-8 and 103961/2018-6).

LITERATURE CITED

- Banerjee, S.; He, Y.; Guo, X.; Si, B.C. Spatial relationships between leaf area index and topographic factors in a semiarid grassland. Joint multifractal analysis. *Australian Journal of Crop Science*, v.5, p.756-763, 2011.
- Caniego, F. J.; Ibáñez, J. J.; San José Martínez, F. Selfsimilarity of pedotaxa distributions at the planetary scale: A multifractal approach. *Geoderma*, v.134, p.306-317, 2006.
- Chhabra, A.; Jensen, R. V. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. *Physical Review Letters*, v.62, p.1327-1330, 1989.
- Dafonte Dafonte, J.; Valcárcel-Armesto, M.; Silva Dias, R.; Vidal Vázquez, E.; Paz González, A. Assessment of the spatial variability of soil chemical properties along a transect using multifractal analysis. *Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe*, v.38, p.11-24, 2015.
- Evertsz, C. J. G.; Mandelbrot, B. B. Self-similarity of harmonic measure on DLA. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v.185, p.77-86, 1992.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed.). World reference base for soil resources. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1994.

- Folorunso, O. A.; Puente, C. E.; Rolston, D. E.; Pinzon, J. E. Statistical and fractal evaluation of the spatial characteristics of soil surface strength. Soil Science Society. America Journal, v.58, p.284-294, 1994.
- Golden Software. Surfer version 11. Surface mapping system. Colorado, USA: Golden. Software, 2014. CD ROM.
- Gonçalves, W. G.; Severiano, E. C.; Silva, F. G.; Costa, K. A. P.; Guimarães-Junnyor, W. S.; Melo, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado latosol growing sugarcane. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.38, p.432-443, 2014.
- Halsey, T. C.; Jensen, M. H.; Kadanoff, L. P.; Procaccia, I.; Shraiman, B. I. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. Physical Review A, v.33, p.1141-1151, 1986.
- Lima, R. P. de; Silva, A. P. da; Giarola, N. F. B.; Silva, A. R. da; Rolim, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. Biosystems Engineering, v.162, p.1-10, 2017.
- Lipiec, J.; Hatano, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. Geoderma, v.116, p.107-136, 2003.
- Otto, R.; Silva, A. P.; Franco, H. C. J.; Oliveira, E. C. A.; Trivelin, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. Soil and Tillage Research, v.117, p.201-210, 2011.
- Paz Ferreira, J.; Marinho, M. A.; Abreu, C. A. de; Vidal Vázquez, E. Soil texture effects on multifractal behaviour of nitrogen adsorption and desorption isotherms. Biosystems Engineering, v.168, p.121-132, 2018.

- Paz Ferreira, J.; Miranda, J. G. V.; Vidal Vázquez, E. Multifractal analysis of soil porosity based on mercury injection and nitrogen adsorption. *Vadose Zone Journal*, v.9, p.325, 2010.
- Paz Ferreira, J.; Marinho, M. A.; Silva, L. F. S.; Motoshima, S. T.; Dias, R. S. 2013. The effects of bulk density and water potential on multifractal characteristics of soil penetration resistance microprofiles measured on disturbed soil samples. *Vadose Zone*, v.12, p.1-13, 2013.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017.
- Roisin, C. J. A multifractal approach for assessing the structural state of tilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.71, p.15-25, 2007.
- Sá, M. A. C. de; Santos Junior, J. D. G. dos.; Franz, C. A. B.; Rein, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.1610-1622, 2016.
- Siqueira, G. M.; Silva, Ê. F. F.; Montenegro, A. A. A.; Vidal Vázquez, E.; Paz Ferreira, J. Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.20, p.529-541, 2013.
- Siqueira, G. M.; Silva, Ê. F. F.; Vidal Vázquez, E.; Paz González, A. Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. *Biosystems Engineering*, v.168, p.105-120, 2018.
- Siqueira, G. M.; Silva, J.; Bezerra, J. M.; Silva, Ê. F. F.; Dafonte, J. D.; Melo, R. F. Estacionariedade do conteúdo de água de um Espodossolo Humilúvico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.19, p.439-448, 2015.

- Souza, G. S. de; Souza, Z. M. de; Cooper, M.; Tormena, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an oxisol under sugarcane cultivation. *Scientia Agricola*, v.72, p.270-277, 2015.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Simões Neto, D. E.; Pedrosa, E. M. R.; Magalhães, A. G.; Silva, Ê. F. F. E. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, p.752-757, 2017.
- Vaz, C. M. P.; Manieri, J. M.; Maria, I. C. De; Tuller, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, v.166, p.92-101, 2011.
- Vepraskas, M. J.; Miner, G. S. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root growth¹. *Soil Science Society of America Journal*, v.50, p.423-427, 1986.
- Vidal Vázquez, E.; Bertol, I.; Siqueira, G. M.; Paz Ferreiro, J.; Dafonte, J. D. Evolution of the soil surface roughness using geostatistical analysis. *Bragantia*, v.69, p.141-152, 2010.
- Vidal Vázquez, E.; Camargo, O. A.; Vieira, S. R.; Miranda, J. G. V.; Menk, J. R. F.; Siqueira, G. M.; Mirás-Avalos, J. M.; Paz González, A. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. *Vadose Zone Journal*, v.12, p.1-13, 2013.
- Wilson, M. G.; Mirás-Avalos, J. M.; Lado, M.; Paz-González, A. Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at varying water contents. *Vadose Zone Journal*, v.15, p.1-10, 2016.

5 PADRÕES MULTIFRACTAIS DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM DIFERENTES PEDOFORMAS

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi analisar a multifractalidade da RP em perfis verticais em diferentes formas do relevo (côncavo e convexo) em área cultivada com soja sob semeadura direta. A área de estudo possui 44,75 ha, e a resistência à penetração (RP) foi medida no dia 22/04/2016 em 70 pontos de amostragem na camada de 0-0,6 m. A análise dos dados foi realizada utilizando o valor de RP média a cada 0.01 m para os pontos de amostragem ($RP_{\text{média}}$), e seus respectivos valores máximos ($RP_{\text{máxima}}$) e mínimos ($RP_{\text{mínimo}}$). A análise multifractal foi realizada para se avaliar as mudanças na estrutura, heterogeneidade e uniformidade dos perfis verticais por meio da propriedade de escala, caracterizando a função de partição, a dimensão generalizada e o espectro de singularidade. A análise multifractal permitiu descrever por meio da função de partição que a $RP_{\text{mínima}}$ possui maior heterogeneidade do que a $RP_{\text{média}}$ e $RP_{\text{máxima}}$ para os 70 pontos de amostragem e nas pedoformas. Os parâmetros multifractais da dimensão generalizada e do espectro de singularidade demonstraram maior homogeneidade e uniformidade dos perfis verticais de RP na pedoforma Tipo B. A análise fractal permitiu descrever a heterogeneidade dos dados em escalas não avaliados pelos métodos análise convencionais, com elevado potencial para a prática da agricultura de precisão.

Palavras-chave: análise multifractal, heterogeneidade de escala, manejo do solo, agricultura de precisão, compactação do solo

INTRODUÇÃO

O conhecimento da resistência do solo à penetração (RP, MPa) permite inferir sobre o estado de compactação de um solo, bem como, determinar alternativas de manejo, com o menor impacto possível sobre os seus atributos, principalmente no que diz respeito ao aumento da densidade e a diminuição da porosidade do solo (Souza et al., 2015; Burr-Hersey et al., 2017; Seidel et al., 2018). Assim, a compreensão da RP ao longo da paisagem é fator primordial para o desenvolvimento de alternativas de manejo com menor impacto sobre as características naturais do solo (Siqueira et al., 2013), e favorecendo o desenvolvimento dos cultivos e o rendimento das culturas (Seidel et al., 2018).

Nesse sentido, Campos et al. (2006) e Siqueira et al. (2010) descrevem a importância do conhecimento das formas da paisagem para um melhor entendimento dos atributos do solo e de suas relações com os cultivos. Camargo et al. (2010) e Leão et al. (2011) estudando a variabilidade espacial de atributos do solo, incluindo a RP em diferentes formas do relevo, encontraram as maiores diferenças para a forma de relevo côncavo, quando comparada a forma do relevo convexa. Siqueira et al. (2010) descrevem ainda que de influenciarem os atributos de solo e planta, as formas do relevo podem ser utilizadas para a predição e melhoria da estimação dos atributos do solo.

Portanto, é preciso compreender como a RP varia ao longo da paisagem, sabendo da ocorrência de diferentes padrões para a escala horizontal e vertical, principalmente em pequenas distâncias (Pachepsky et al., 1996). A análise multifractal tem como objetivo a determinação de variações em diferentes compartimentos por meio da propriedade de escala (Miranda et al., 2006; Vidal Vázquez et al., 2013). Desta maneira, é possível estudar perfis de RP com elevada variabilidade em profundidade, por meio do estudo de diferentes

compartimentos, que diferenciam, apresentando heterogeneidade de escala (Siqueira et al., 2013).

Poucos são os estudos que se dedicaram ao estudo fractal e multifractal da RP. Folorunso et al. (1994), realizaram estudo estatístico e fractal da RP na superfície do solo. Roisin (2007) avaliou a RP por meio de análise multifractal objetivando compreender o estado de estruturação do solo. Paz Ferreira et al. (2013) se dedicaram ao estudo da multifractalidade de microperfis de RP. Siqueira et al. (2013) desenvolveram estudo da multifractalidade e variabilidade intrínseca de perfis verticais de RP em solo com elevado conteúdo de água. Wilson et al. (2016) estudaram a influência do déficit hídrico sobre a estrutura multifractal de perfis verticais de RP. Desta maneira, se verifica que na literatura não há estudos que se dediquem ao estudo da geometria fractal e multifractal de dados de RP em diferentes formas do relevo.

Assim, a hipótese deste trabalho é que as medidas de RP ao longo da paisagem variam de acordo forma do relevo. O objetivo deste trabalho foi analisar a multifractalidade da RP em perfis verticais em diferentes formas do relevo (côncavo e convexo) em área cultivada com soja sob semeadura direta.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo possui cerca de 44,75 ha e está localizada no município de Mata Roma (Maranhão, Brasil), cujas coordenadas geográficas são: 3° 70'80.88" S e 43° 18' 71.27" W. O clima é do tipo Aw (tropical quente e úmido), com temperatura média anual superior a 27 °C e precipitação pluvial média anual de 1835 mm, com chuvas concentradas de janeiro e junho. O solo da área de estudo é um Latossolo Amarelo Distrófico argissólico

(EMBRAPA, 2018), e as suas principais características físicas e químicas são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Caracterização física e química do solo da área de estudo cultivado com soja sob semeadura direta.

0-0,2 m													
Areia	Silt	Argila	BD	Macro	Micro	TP	OM	pH	P	K	Ca	Mg	CEC
----- gkg ⁻¹ -----			Mgm ⁻³	----- m ³ m ⁻³ -----			gdm ³		mg dm ³	----- mmolc/dm ³ -----			
745,258	138,214	117,143	1,268	0,169	0,378	0,547	22	5	49	0,7	18	3	46,7
0,2-0,4 m													
Areia	Silt	Argila	BD	Macro	Micro	TP	OM	pH	P	K	Ca	Mg	CEC
----- gkg ⁻¹ -----			Mgm ⁻³	----- m ³ m ⁻³ -----			gdm ³		mg dm ³	----- mmolc/dm ³ -----			
737,772	141,7	120,629	1,291	0,16	0,372	0,532	19	4,7	47	0,5	17	3	45,6

BD: soil bulk density; Macro: macroporosity; Micro: microporosity; TP: total porosity; OM: organic matter; CEC: Cation

exchange capacity

A área de estudo vem sendo manejada com soja (*Glicine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) em rotação desde 2007 sob sistema de semeadura direta, com subsolagem até 0.32 m de profundidade para diminuição da compactação do solo a cada cinco anos. No ano agrícola de 2015/2016 foram demarcados na área de estudo 70 pontos de amostragem seguindo as linhas de plantio com espaçamento regular de 100 x 35 m (Figura 1). Os pontos foram georreferenciados por meio de GPS com correção diferencial pós processada (DGPS). A área possui relevo suave ondulado, e conforme Figura 1 possui duas unidades de relevo: côncava (Tipo A: relevo entre 101,8-103,8 m com 38 pontos de amostragem) e convexa (Tipo B: relevo entre 103,8-105,8 m, com 32 pontos de amostragem).

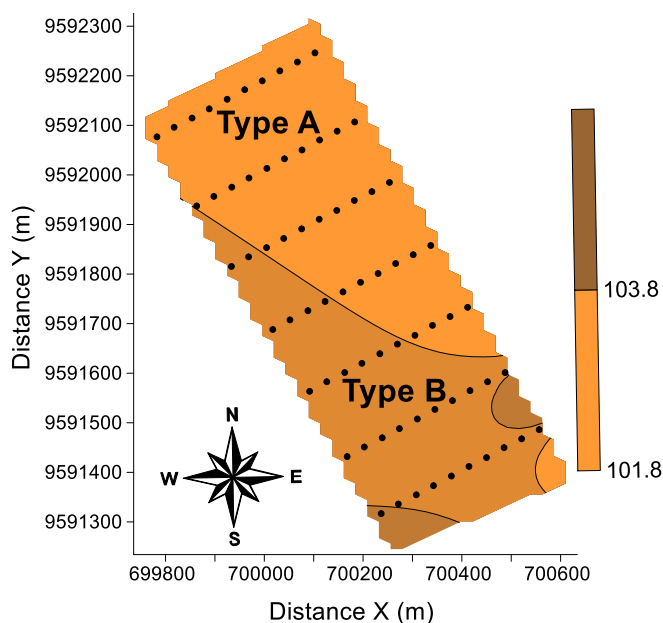


FIGURA 1. Mapa de relevo da área de estudo apresentando as pedoformas côncava (Tipo A) e convexa (Tipo B) e localização geográfica dos 70 pontos de amostragem com espaçamento de 100 x 35 m.

A resistência do solo à penetração (RP, MPa), foi determinada no dia 22/04/2016 por meio de penetrômetro de impacto Planalsucar/Stolf (Stolf, 1998), com ângulo de cone de 30°. A RP foi avaliada na camada de 0-0,6 m de profundidade, e depois calculados os valores para cada 0,01 m, conforme Stolf (1998).

Para efeito de se verificar as maiores diferenças das leituras de RP nos 70 pontos de amostragem e nas pedoformas (A e B) foram utilizados os valores de RP média (RP_{media}), máxima (RP_{maxima}) e mínima (RP_{minima}) dos perfis verticais a cada 0.01 m foram submetidos a análise multifractal. As leituras de RP foram realizadas com o solo em capacidade de campo, sendo de $0.171 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para os 70 pontos de amostragem, de $0,172 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a pedoforma Tipo A e de $0,170 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a pedoforma Tipo B, determinada por meio de câmara de Richards.

Os dados foram analisados por meio da estatística descritiva utilizando o software R 3.3.1 (R Core Team,(2017) para determinação dos seguintes medidas: média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose e D (desvio máximo em relação

à distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov com probabilidade de erro de 0,01).

A análise multifractal foi realizada considerando a propriedade de escala por meio do método do momento, para cada perfil vertical de RP, permitindo a determinação da função de partição, dimensão generalizada e espectro de singularidade, conforme procedimentos descritos por Evertsz & Mandelbrot (1992). O conjunto de algoritmos utilizados neste estudo são apresentados na Tabela 2.

A função de partição foi construída para sucessivos segmentos em 2^k , $k = 0$ a $k = 6$, e momentos no intervalo de $q = +5$ a $q = -5$ (Evertsz & Mandelbrot, 1992; Caniego et al., 2006), generalizando em uma escala δ a um número de segmentos $N(\delta) = 2^k$ de tamanho característico, $\delta = L \times 2^{-k}$, correspondendo ao comprimento dos perfis verticais de RP (0,6 m). A probabilidade da função de massa, $p_i(\delta)$ (Equação 1a), descrevendo o valor do segmento $[N_i(\delta)]$, e a soma da medida em todo o transepto $[N_i]$, sendo q definido para $-\infty < q < \infty$. Possibilitando a avaliação do tamanho dos segmentos, $n(\delta)$ em escala normalizada $\mu_i(\delta)$, conforme Equação 1b permitindo plotar $\chi(q, \delta)$ versus δ (Halsey et al., 1986); em seguida foi determinado o expoente de função de massa $[\tau(q) - \text{Equação 1c}]$.

A função de escala (τ_q) se relaciona com a dimensão fractal generalizada (Hentschel & Procaccia, 1983), sendo definida pela Equação 2a. A dimensão generalizada (D_q) ou dimensão de Rényi de ordem q , também pode ser determinada pela Equação 2b, neste caso, a D_1 é indeterminada porque o valor do denominador é igual a zero (0). Todavia, para $q = 1$ a equação (2c) é utilizada, nesse caso, possibilitando a determinação das dimensões para a momentos $q = 0$, $q = 1$ e $q = 2$, denominados então de dimensão de capacidade (D_0), dimensão de entropia ou entropia de Shannon (D_1) e dimensão de correlação (D_2) (Hentschel & Procaccia, 1983).

TABELA 2. Conjunto de equações utilizadas na análise multifractal.

Equações	
	$p_i(\delta) = \frac{N_i(\delta)}{N_t}$ (1a)
Função de partição	$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} p_i^q(\delta)$ (1b)
	$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \chi(q, \delta)}{\log(1/\delta)}$ (1c)
	$D_q = \tau(q)/(q - 1)$ (2a)
Dimensão generalizada	$D_q = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log[\chi(q, \delta)]}{\log \delta}$ (2b)
	$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \chi_i(1, \delta) \log[\chi_i(1, \delta)]}{\log \delta}$ (2c)
	$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[p_i(\delta)]}{\log(\delta)}$ (3a)
Espectro de singularidade	$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(q, \delta)]}{\log(\delta)}$ (3b)

Para de determinar o espectro de singularidade utilizando as equações 3a e 3b, é preciso considerar que em medidas multifractais, o número $[N_\delta(\alpha)]$ de células de tamanho δ , com singularidade ou expoente de Hölder igual a α , e aumenta ou diminui juntamente com δ . Neste caso, obedece uma lei de potência: $N(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)}$, descrevendo que o expoente $f(\alpha)$ é uma função contínua de α . O gráfico do espectro de singularidade típico possui forma de parábola côncava descendente, com os valores de α aumentando em função da heterogeneidade da medida. O escalonamento do expoente τ_q e $f(\alpha)$ pode ser obtido por meio de transformação de Legendre, no entanto, o presente estudo utiliza Chhabra e Jensen (1989), conforme Equações 3a 3b.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o gráfico da RP média para os 70 pontos de amostragem, e para as unidades de relevo A e B. Verifica-se aumento da RP próximo 0,3 m de profundidade, sendo o maior valor médio de RP de 3,052 MPa para a pedoforma Tipo B; 3,345 MPa para os 70 pontos de amostragem e de 3,718 MPa para a pedoforma Tipo A. De acordo com Moraes et al. (2014) valores de RP maiores que 3,5 MPa podem ser considerados críticos para o desenvolvimento dos cultivos no sistema de semeadura direta; e permitem determinar estratégias de manejo relacionadas com o estado de compactação do solo (Souza et al., 2015; Cortez et al., 2018; Seidel et al., 2018). A unidade de relevo Tipo A (côncava, Figura 1 e 2b) apresentou o maior valor médio de RP (3,718 MPa) e a maior variação do desvio padrão ao longo do perfil, indicando elevada variabilidade vertical dos dados. Camargo et al. (2010), Siqueira et al. (2010) e Leão et al. (2011) descrevem que os atributos do solo possuem maior variabilidade em unidade de relevo côncava.

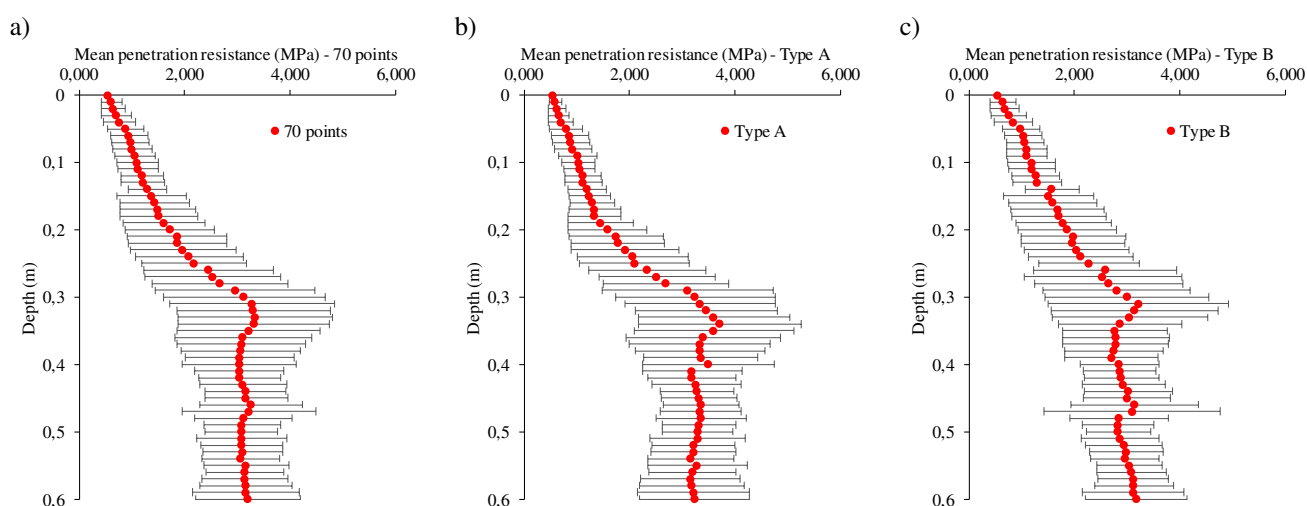


FIGURA 2. Valor médio da RP e desvio padrão para os 70 perfis (a), e para as pedoformas Tipo A (b) e Tipo B (c) na área de estudo cultivada com soja sob semeadura direta.

A análise estatística da RP_{media} , RP_{maxima} e RP_{minima} para os perfis verticais de RP (Tabela 3) demonstrou que o menor valor de RP_{media} ocorreu na unidade de relevo Tipo B ($RP_{media} = 2,277$ MPa), seguido pelos 70 pontos de amostragem ($RP_{media} = 2,333$ MPa) e pela unidade de relevo Tipo A ($RP_{media} = 2,374$ MPa), padrão que se repete para os valores de RP_{maxima} . Os valores de RP_{minima} demonstraram que o menor valor médio de RP foi descrito para os 70 pontos de amostragem ($RP = 0,852$ MPa), seguido pela pedoformas Tipo A ($RP = 0,914$ MPa) e Tipo B ($RP = 0,935$ MPa). Sendo assim, verificamos que a análise da RP para os 70 pontos de amostragem subestima a média dos valores de RP (Tabela 3).

O menor valor de coeficiente de variação (CV) foi descrito para a pedoformas Tipo B (CV = 37,021%), seguido pelos 70 pontos de amostragem (CV = 41,168%) e pela pedoforma Tipo A (CV = 45.648%), sendo medianos de acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980). Assim, tais diferenças nos valores de CV justificam a necessidade de estudo em separado das medidas de RP nas pedoformas, uma vez que, a diferença entre o menor e o maior valor de CV médio é de cerca de 8%.

TABELA 3. Estatística descritiva para as três unidades da resistência do solo a penetração.

	----- 70 pontos -----			----- Unidade A -----			----- Unidade B -----		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Média	2,333	4,801	0,852	2,374	4,533	0,914	2,277	4,355	0,935
Variância	0,922	4,855	0,153	1,175	4,597	0,239	0,710	3,652	0,186
Desvio padrão	0,960	2,203	0,391	1,084	2,144	0,489	0,843	1,911	0,431
CV%	41,168	45,890	45,864	45,648	47,303	53,518	37,021	43,886	46,104
Assimetria	-0,545	-0,078	1,715	-0,418	-0,041	1,881	-0,665	-0,051	1,022
Curtose	-1,373	-0,917	1,819	-1,568	-0,896	2,204	-1,068	-0,537	-0,454
D	0,278Ln	0,136n	0,396Ln	0,274Ln	0,161n	0,438Ln	0,224Ln	0,132n	0,36Ln

D: Desvio máximo em relação à distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov com probabilidade de erro de 0,01.

A RP_{maxima} para os 70 pontos de amostragem e para a pedoforma tipo B apresentou distribuição de frequência normal, enquanto que, os demais dados apresentaram distribuição de frequência lognormal, por meio do teste de normalidade dos dados de Kolmogorov-

Smirnov ($p < 0,01\%$). Os valores de assimetria e curtose variaram entre 0 e 3, confirmando que a maior parte dos dados possui distribuição de frequência lognormal, conforme relatado por Carvalho et al. (2002).

Os valores da função de partição são apresentados na Figura 3. O gráfico foi construído considerando segmentos 2^k , $k=0$ a $k=6$, com coeficientes de determinação (R^2) maiores que 0.9. A $RP_{\text{máxima}}$ apresentou o maior ajuste para a pedoforma A ($R^2 = 0,999$ - Figura 3e), e o pior ajuste para pedoforma B ($R^2 = 0,996$ - Figura 3h); os gráficos da função de partição para $RP_{\text{média}}$ foram ajustados com $R^2 = 0,999$ (Figura 3a; d; g), e os gráficos de $RP_{\text{mínima}}$ foram ajustados com $R^2 = 0,998$ (Figura 3c; f; i). Visualmente os gráficos de $RP_{\text{mínima}}$ para os 70 pontos de amostragem (Figura 3c) e na pedoforma A (Figura 3f) apresentam maior variabilidade e heterogeneidade dos dados no intervalo de $q=5$ a $q=-5$. Morató et al. (2017) estudando a multifractalidade de variáveis físicas do solo apresentam gráfico da função de partição com comportamento similar aos encontrados neste estudo para a $RP_{\text{mínima}}$; as variações dos momentos refletem a variabilidade dos dados, uma vez que $RP_{\text{mínima}}$ apresenta os maiores valores de CV (% - Tabela 3).

As funções de partição tipificadas para a RP (Figura 3) sob cultivo de soja sob semeadura direta foram caracterizadas em múltiplas escalas, ou seja, escalas multifractais, obedecendo a uma lei de potência, conforme descrito por Banerjee et al. (2011), Bertol et al. (2017), Siqueira et al. (2013) e Wilson et al. (2016).

Os valores da dimensão generalizada (D_{-5} - D_5 , D_{-5} , D_5 , D_0 , D_1 e D_2) e do espectro de singularidade ($q+$, $q-$, α_0 , α_{max} e α_{min}) são apresentados na Tabela 4. Os menores valores de diferença entre D_{-5} - D_5 , são de 0,340 ($PR_{\text{média}}$) e 0,333 ($PR_{\text{máximo}}$ e $PR_{\text{mínimo}}$) na pedoforma B. De acordo com Dafonte Dafonte et al. (2015) a diferença de D_{-5} - D_5 é frequentemente utilizada como um índice de multifractalidade, assim, a pedoforma B possui diferentes graus de scaling heterogeneity or multifractativity. Os resultados descrevem que quanto maior o

ajuste dos dados da função de partição, maior é a diferença entre $D_{-5}-D_5$ (Figura 3 e Tabela 4), indicando que as diferenças nos valores de RP em profundidade possuem variações que são explicadas e relacionadas com o manejo do solo na área de estudo sob semeadura direta. Portanto, estudos que permitam compreender a dinâmica multifractal dos atributos do solo são importantes, pois permitem inserir novos parâmetros ao processo de tomada de decisão. No entanto, é preciso considerar que os solos não são fractais ideais (Kravchenko & Pachepsky, 2004), e por essa razão o processo de tomada de decisão deve considerar o solo como um sistema dinâmico e utilizar diferentes ferramentas de modelagem.

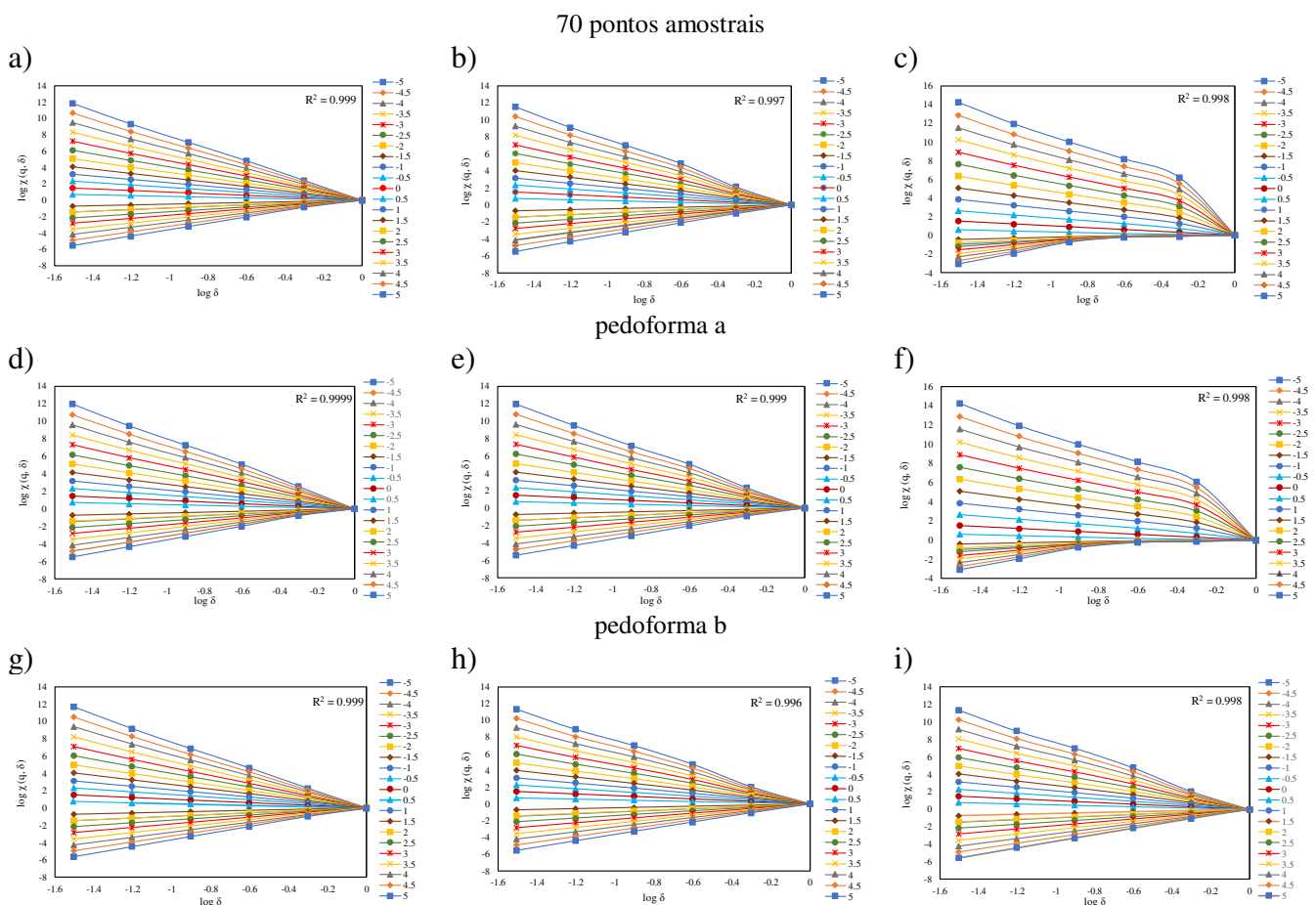


FIGURA 3. Função de partição $\chi(q, \delta)$ para a resistência do solo a penetração nos 70 pontos amostrais [RP_{media} (a), RP_{maximo} (b) e RP_{minimo} (c)], Pedoforma A [RP_{media} (d), RP_{maximo} (e) e RP_{minimo} (f)] e Pedoforma B [RP_{media} (g), RP_{maximo} (h) e RP_{minimo} (i)] sob cultivo de soja.

Tabela 4. Parâmetros multifractais obtidos para a dimensão generalizada (D_{-10} - D_{10} , D_{-10} , D_{10} , D_0 , D_1 e D_2) e espectro de singularidade (q_+ , q_- , α_0 , α_5 e α_s).

		Dimensão generalizada				
		D_{-5} - D_5	D_{-5}	D_5	D_0	D_1
70 pontos						
PR_{media}	0,359	0,939±0,020	1,297±0,010	1,000±0,000	0,971±0,005	0,956±0,011
PR_{maxima}	0,367	0,910±0,008	1,278±0,023	1,000±0,000	0,968±0,004	0,946±0,006
PR_{minimo}	0,920	0,507±0,104	1,427±0,189	1,000±0,000	0,642±0,006	0,545±0,090
Pedoforma A						
PR_{media}	0,377	0,930±0,025	1,307±0,019	1,000±0,000	0,966±0,008	0,948±0,014
PR_{maxima}	0,410	0,910±0,014	1,320±0,019	1,000±0,000	0,963±0,004	0,942±0,008
PR_{minimo}	0,921	0,511±0,103	1,432±0,186	1,000±0,000	0,648±0,068	0,550±0,090
Pedoforma B						
PR_{media}	0,340	0,945±0,016	1,285±0,011	1,000±0,000	0,975±0,004	0,962±0,008
PR_{maxima}	0,333	0,925±0,006	1,258±0,025	1,000±0,000	0,972±0,003	0,955±0,005
PR_{minimo}	0,333	0,925±0,006	1,258±0,025	1,000±0,000	0,972±0,003	0,955±0,005
Espectro de singularidade						
		q_-	q_+	α_0	α_{-5}	α_5
70 pontos						
PR_{media}	5,000	-4,000	1,038±0,007	1,515±0,022	0,927±0,036	
PR_{maxima}	5,000	-3,500	1,039±0,007	1,461±0,047	0,876±0,014	
PR_{minimo}	1,500	-5,000	1,365±0,124	1,593±0,297	0,532±0,116	
Pedoforma A						
PR_{media}	5,000	-4,000	1,044±0,010	1,520±0,036	0,917±0,042	
PR_{maxima}	5,000	-4,000	1,047±0,007	1,539±0,035	0,879±0,025	
PR_{minimo}	1,500	-5,000	1,359±0,123	1,603±0,292	0,536±0,116	
Pedoforma B						
PR_{media}	5,000	-3,500	1,032±0,004	1,483±0,030	0,933±0,029	
PR_{maxima}	5,000	-3,500	1,034±0,006	1,432±0,051	0,894±0,009	
PR_{minimo}	5,000	-3,500	1,034±0,006	1,432±0,051	0,894±0,009	

D_{-5} - D_5 : Diferença entre dimensão máxima e dimensão mínima; D_5 : Dimensão máxima; D_{-5} : Dimensão mínima; D_0 :

Dimensão de capacidade; D_1 : Dimensão de entropia; D_2 : Dimensão de correlação.

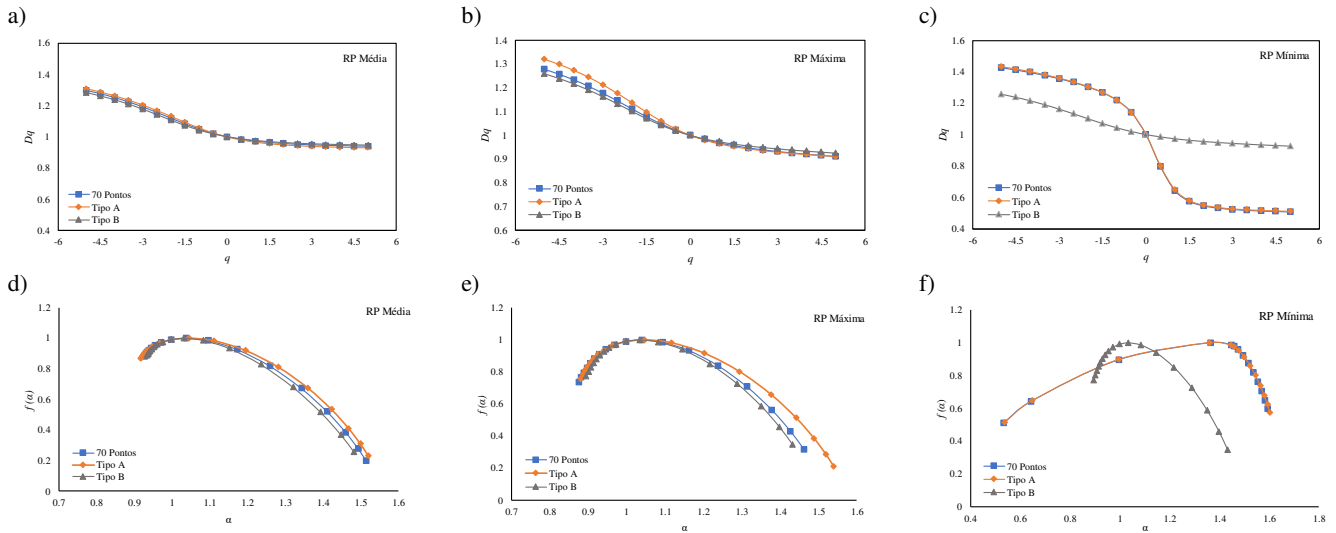


Figura 4. Dimensão generalizada (a; b; c) e espectro de singularidade (d; e; f) para os perfis verticais de resistência do solo a penetração.

Os valores de dimensão de capacidade (D_0 - Tabela 4 e Figura 4a; b; c) são constantes para os dados em estudo ($D_0 = 1.000$). D_0 fornece uma informação global ou média do sistema, e neste caso, permite descrever que os dados em estudo possuem homogeneidade das séries de dados (RP_{media} , RP_{maxima} e RP_{minima}). A dimensão de informação ou entropia de Shannon (D_1) quantifica o grau de desordem de uma distribuição, e de acordo com Gouyet (1996) o valor de D_1 está no intervalo $0 < D_1 < 1$. Portanto, valores de D_1 próximos de 1 caracterizam um sistema uniformemente distribuído em todas as escalas, enquanto que um valor de D_1 próximo a 0 reflete um subconjunto de escalas na qual as irregularidades estão concentradas (Villas-Boas et al., 2014). As séries de dados de RP descrevem sistemas uniformemente distribuídos, e os dados variam de 0,642 (RP_{minima} – 70 pontos) a 0,975 (RP_{media} – Pedorforma B). Vale ressaltar que, a RP na pedorforma A apresentou os menores valores de D_1 , em comparação com os demais dados. D_2 ou dimensão de correlação computa a correlação de intervalos de tamanho (L), ou seja, é uma medida geométrica que descreve a complexidade dos segmentos de um intervalo, sendo os segmentos correlacionados, então, quanto maior a dimensão maior será D_2 . Os maiores valores de D_2 foram descritos na

pedoforma B ($PR_{\text{media}} = 0,962$; $PR_{\text{maxima}} = 0,955$; $PR_{\text{minima}} = 0,955$), enquanto que pedoforma apresentou os menores valores de D_2 ($PR_{\text{media}} = 0,948$; $PR_{\text{maxima}} = 0,942$; $PR_{\text{minima}} = 0,550$).

Os valores de D_0 , D_1 e D_2 apresentaram diferenças entre as séries de dados, que permitiram caracterizar que os sistemas em estudo são multifractais, pois, de acordo com Banerjee et al. (2011) para que um atributo seja multifractal as dimensões devem a seguir a seguinte tendência: $D_0 > D_1 > D_2$. Portanto, as séries de dados representam sistemas multifractais, e os dados permitiram descrever mudanças nos valores de dimensão nas diferentes formas do relevo, evidenciando que as amostragens de RP devem considerar as mudanças da paisagem.

Os parâmetros do espectro de singularidade (q_- , q_+ , α_0 , α_5 e α_{-5} – Tabela 4), descrevem que os dados possuem amplitudes variáveis, conforme valores de q_- e q_+ (Tabela 4 e Figuras 4d; e; f). O expoente de Hölder (α_0) quantifica a irregularidade da densidade local de uma medida (L) em qualquer ponto de um sistema multifractal, e os menores valores (α_0) estão associados a pedoforma B, variando entre $1,032 \pm 0,004$ e $1,034 \pm 0,006$, seguido pelos 70 pontos de amostragem (variando entre $1,038 \pm 0,007$ e $1,365 \pm 0,124$) e pela pedoforma A (variando entre $1,044 \pm 0,010$ e $1,359 \pm 0,123$).

A pedoforma A apresentou a maior amplitude ($\alpha_{-5} - \alpha_5$), sendo: $PR_{\text{media}} = 0,603$; $PR_{\text{maxima}} = 0,66$; $PR_{\text{minima}} = 1,067$. A diferença entre $\alpha_{-5} - \alpha_5$ é um indicador da heterogeneidade, neste caso a maior heterogeneidade está relacionada a PR_{minima} (Figura 4f). É importante salientar que a PR_{minima} para os 70 pontos e para a pedoforma A descrevem maior heterogeneidade/entropia, com valores de $\alpha_{-5} - \alpha_5$ de 1,061 e 1,067 respectivamente; enquanto que o valor de $\alpha_{-5} - \alpha_5$ para a pedoforma B é de 0,538, confirmando a menor heterogeneidade ou menor entropia do sistema na pedoforma B, ou seja, quanto menor a diferença entre $\alpha_{-5} - \alpha_5$, mais homogêneo (Villas-Boas et al., 2014). Portanto, o espectro de singularidade quantifica a variabilidade das medidas de RP nos perfis verticais.

Os parâmetros multifractais das séries de dados de RP, evidenciaram que existe diferenciação da variabilidade dos dados nas diferentes pedoforma, sendo a pedoforma A mais heterogênea que a pedoforma B. Ressaltamos ainda, que a análise conjunta de todos os perfis verticais de RP (70 pontos) é influenciada principalmente pelos valores de RP na pedoforma A. Tal fato é confirmado pelo gráfico do espectro de singularidade (Figura 4f), onde os valores mínimos de RP para os 70 pontos de amostragem e na pedoforma A possuem comportamento diferenciado em relação a pedoforma B.

CONCLUSÕES

Os perfis verticais de RP nas diferentes formas de relevo, apresentaram diferenciação por meio da análise multifractal, descrevendo que a forma do relevo côncava (Tipo A) possui diferenças que não seriam detectadas por meio de métodos de análise convencionais.

A $RP_{\text{mínima}}$ nas diferentes formas de relevo evidenciou a maior multifractalidade dos dados, apresentando maior variação de escala.

A dimensão generalizada e o espectro de singularidade comprovaram a maior heterogeneidade de escala para o relevo côncavo (Tipo A), demonstrando que a análise multifractal é eficiente para se averiguar as diferenças na RP em perfis verticais ao longo da paisagem, cujos padrões multifractais foram diferenciados por meio da dimensão de capacidade (D_0), dimensão de entropia (D_1) e pela dimensão de correlação (D_2).

AGRADECIMENTOS

Authors acknowledge to Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) financial support for publication (UNIVERSAL-001160/17 and BD-02105/17). This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001". Thanks also to Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Process 429354/2016-9, 307619/2016-8 and 103961/2018-6.

REFERÊNCIAS

- Banerjee S, He Y, Guo X, Si BC (2011) Spatial relationships between leaf area index and topographic factors in a semiarid grassland. Joint multifractal analysis. *Australian Journal of Crop Science* 5(6):756.
- Bertol I, Schick J, Bandeira DH, Paz Ferreiro J, Vázquez EV (2017) Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: a case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil. *Geoderma* 287(1): 116-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.008>
- Burr-Hersey JE, Mooney SJ, Bengough AG, Mairhofer S, Ritz K (2017) Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *PloS one* 12(7):e0181872. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181872>

- Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT (2010) Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34(3):617-630. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300003>
- Campos MCC, Cardozo NP, Marques Júnior J (2006) Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos pedológicos. *Revista de Biologia Ciência da Terra* (6):104-114.
- Caniego J, Ibáñez JJ, Martínez FSJ (2006) Selfsimilarity of pedotaxa distributions at the planetary scale: a multifractal approach. *Geoderma* 134(3-4):306-317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.007>
- Carvalho JRP, Silveira PM, Vieira SR (2002) Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37(8):1151-1159. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002000800013>
- Chhabra A, Jensen RV (1989) Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. *Physical Review Letters*. 62(12):1327-1330. DOI: 10.1103/PhysRevLett.62.1327
- Cortez JW, Cavassini VH, Motomiya AVA, Orlando RC, Valente IQM (2018) Spatialization of soil resistance to penetration for localized management by precision agriculture tools. *Revista Engenharia Agrícola*. 38(5):690-696. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n5p690-696/2018>
- Dafonte Dafonte J, Armesto MV, Dias RDS, Vidal Vázquez E, González AP (2015) Assessment of the spatial variability of soil chemical properties along a transect using multifractal analysis. *Cadernos do laboratório Xelóxico de Laxe* 38:11-24.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, EMBRAPA, 590p.
- Evertsz CJG, Mandelbrot BB (1992) *Chaos and Fractals*. ed. by H.-O. Peitgen, H. Jürgens, D. New York, Springer.

- Folorunso OA, Puente CE, Rolston DE, Pinzon JE (1994) Statistical and fractal evaluation of the spatial characteristics of soil surface strength. *Soil Science Society of America Journal* 58(2):284-294. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800020004x
- Gouyet JF (1996) *Physics and Fractals Structure*. Nova York: Springer, 1996.
- HalseyTC, Jensen MH, Kadanoff LP, Procaccia I, Shraiman BI (1986) Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets, *Physical Review A* 33:1141–1151. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.33.1141>
- Hentschel HGE, Procaccia I (1983) The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 8(3):435-444. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(83\)90235-X](https://doi.org/10.1016/0167-2789(83)90235-X)
- Kravchenko AN, Pachepsky YA (2004) *Soil Variability Assessment with Fractal Techniques* Alvarez-Benedi J, Munoz-Carpena R. (Eds.), *Soil-Water-Solute Process Characterization: An Integrated Approach*, Boca Ratón, CRC Press, pp. 617-638.
- Leão MG, Júnior JM, Souza ZM, Tadeu, GP, Siqueira DS (2011) Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos do solo em área cultivada com citros. *Engenharia Agrícola* 31(4):643-651. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000400003>
- Miranda JGV, Montero E, Alves MC, González AP, Vidal Vázquez E (2006) Multifractal characterization of saprolite particle-size distributions after topsoil removal. *Geoderma* 134(3-6):373-385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.014>
- Moraes MT, Debiasi H, Carlesso R, Franchini JC, Silva VR (2014) Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38(1):288-298. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- Morató MC, Castellanos MT, Bird NR, Tarquis AM (2017) Multifractal analysis in soil properties: Spatial signal versus mass distribution. *Geoderma* 287(1):54-65

- Pachepsky Y, Yakovchenko V, Rabenhorst MC, Pooley C, Sikora LJ (1996) Fractal parameters of pore surfaces as derived from micromorphological data: effect of long-term management practices. *Geoderma* 74(3-4):305-319. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00073-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00073-0)
- Paz Ferreiro J, Luz LRQP, Lado M, Vidal Vázquez E (2013) Specific surface area and multifractal parameters of associated nitrogen adsorption and desorption isotherms in soils from Santa Catarina, Brasil. *Vadoze Zone Journal* 12(3):1-14. DOI: DOI: 10.2136/vzj2012.0203
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017.
- Roisin CJ (2007) A multifractal approach for assessing the structural state of tilled soils. *Soil Science Society of America Journal* 71(1):15-25. DOI: DOI: 10.2136/sssaj2006.0132
- Seidel EP, Schneider APH, Sustakowski MC, Matté LM, Mottin MC, Silva JH (2018) Soybean Yield, Soil Porosity and Soil Penetration Resistance under Mechanical Scarification in No-Tillage System. *Journal of Agricultural Science* 10(4):268-277. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n4p268>
- Siqueira DS, Marques Júnior J, Pereira GT (2010) The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma* 155(1-2):55-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.024>
- Siqueira GM, Silva EFF, Montenegro AAA, Vidal Vázquez E, Paz Ferreiro J (2013) Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. *Nonlinear Processes in Geophysics* (20):529-541. DOI: <https://doi.org/10.5194/npg-20-529-2013>

- Siqueira GM, Silva EFF, Vidal Vázquez E, González AP (2018) Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. *Biosystems Engineering* 168:105-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.024>
- Souza GSD, Souza ZMD, Cooper M, Tormena CA (2015) Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Scientia Agricola*. 72:270-277. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0078>
- Stolf R, Cassel DK, King LD, Reichardt K (1998) Measuring mechanical impedance in clayey gravelly soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 22(2):189-196. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831998000200003>
- Vidal Vázquez E, Bertol I, Siqueira GM, Paz Ferreiro J, Dafonte Dafonte J (2010) Evolution of the soil surface roughness using geostatistical analysis. *Bragantia* 69(10):141-152. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052010000500015>
- Vidal Vázquez E, Camargo OA, Vieira SR, Miranda JGV, Menk JRF, Siqueira GM, González AP (2013) Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. *Vadose Zone Journal* 12(3): vzt2012.0188. DOI: DOI: 10.2136/vzt2012.0188
- Vidal Vázquez, E, Garcia Moreno R, Miranda JGV, Diaz MC, Saa Requejo A, Paz Ferreiro J, Tarquis AM (2008) Assessing soil surface roughness decay during simulated rainfall by multifractal analysis. *Nonlinear Processes Geophysics* 15:457-468. DOI: DOI: 10.5194/npg-15-457-2008
- Villas-Boas PR, Crestana S, Posadas A (2014) Modelagem e simulação, In: *Conceitos e Aplicações da Instrumentação para o Avanço da Agricultura – Naime JM, Mattoso LHC, Silva WTL, Cruvinel PE, Martin Neto L, Crestana S, Brasília: EMBRAPA, p.359-388.*

Warrick AW (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. Application of soil physics. D. Hillel. p.319-344.

Wilson MG, Mirás-Avalos JM, Lado, M, González, AP (2016) Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at varying water contents. Vadose Zone Journal. 15(2): vzj2015.04.0063. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2015.04.0063>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de técnicas de geometria multifractal para o estudo da RP do solo em perfis verticais em cultivo de cana-de-açúcar e soja permitiu descrever padrões de multifractalidade em diferentes escalas, demonstrando que a RP apresenta uma elevada variabilidade ao longo da paisagem. A presença de multifractalidade para os dados de RP nos cultivos de cana-de-açúcar e soja permite inferir que o uso de valores médios de RP comumente utilizados no processo de uso e manejo do solo não descrevem com fidelidade as variações em pequenas escalas. De maneira geral, o uso do solo nos cultivos de cana-de-açúcar e soja descreveram valores mais elevados de RP na camada entre 0.3-0.4 m de profundidade, necessitando de mais estudos para se inferir sobre possíveis problemas de compactação, uma vez que tal estudo deve incluir os parâmetros que interferem sobre o estado de compactação de um solo, como conteúdo de água, estrutura, conteúdo granulométrico e densidade do solo. O presente estudo se justifica uma vez que incluem ao processo de produção informações sobre a variabilidade da RP até então ignoradas. O estudo da RP em diferentes compartimento do relevo indicou ser uma alternativa para a estimação e predição de dados com maior acurácia, ademais de contribuir para a determinação de zonas de manejo do solo homogêneo e dos cultivos. O presente estudo engloba a modelagem matemática como uma ferramenta auxiliar para a aplicação de técnicas de agricultura de precisão, permitindo assim a maximização do uso do solo e o aumento do rendimento dos cultivos, evitando a abertura de novas áreas de cultivo. Desta maneira, tais estudos colaboram com a conservação ambiental de áreas de Cerrado e Amazônia no Estado do Maranhão, permitindo a geração de informações adaptadas as condições ambientais e de produção dos cultivos de cana-de-açúcar e soja no Estado do Maranhão, que podem ser ampliados para outros estados das regiões Norte e Nordeste.

ANEXOS

ANEXO A – NORMAS DA REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

GUIDELINES FOR AUTHORS

The norms of the Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Agriambi), presented herein, are subject to modifications over time; thus, we suggest the authors to consult them at the moment of the submission of their manuscripts. The manuscripts must not have been sent to any other journal and will be selected for evaluation by the reviewers only if totally within the norms of this Journal.

Authors must have their manuscripts reviewed by a specialist for orthography and grammar correction of Portuguese and English before submitting or returning them to the Journal, at any step of the process. Manuscripts with orthography problems will be negatively affected in the evaluation and may be rejected for this reason. Manuscripts addressing research with experiment will only be accepted for publication if at least one of the following criteria is met: a) experiment with minimum of 20 plots; b) experimental design with number of residual degrees of freedom equal to or higher than ten; and c) treatments must have at least three replicates. Scientific manuscripts that describe research results obtained more than 8 years ago will not be accepted for publication. Authors must inform, in the items Abstract, Resumo and Material and Methods, the period and place (including geographical coordinates) of the research and, in the case of research with experiment, the experimental design, treatments and the number of replicates. Manuscripts subdivided into parts I, II and III etc. must be submitted together, since they will be sent to the same reviewers.

Languages and study areas

The scientific manuscripts subjected to the Agriambi Journal must be original and unpublished and written in Portuguese or English. However, from the Volume 20, Issue number 1 (January 2016) on, the Agriambi Journal will be completely published in English. For articles accepted for publication, the authors will be asked to arrange the correction of English in articles already submitted in this language or the translation into English of articles originally submitted in Portuguese, through one of the companies accredited by the Journal, according to the list available on the site www.agriambi.com.br. The manuscripts must result from researches in one of the following areas: Soil, Water and Plant Management, Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Meteorology and

Climatology, Storage and Processing of Agricultural Products, Environmental Control and Management (this area includes only manuscripts describing researches on environmental control and management in the agricultural context), Rural Construction and Ambience, Automation and Instrumentation, Agricultural Machines and Energy in Agriculture. The Journal accepts contributions only in the modalities of Scientific Paper and Literature Review. Contributions in the modalities of Preliminary Note and Technical Note are not accepted by the Journal. In addition, it should be pointed out that the Journal does not publish manuscripts of extension and/or purely technical nature; manuscripts simply describing the development of software/electronic spreadsheets will not be accepted for publication.

Sequence of items in the manuscript

a) Title: it encompasses the content and the objective of the study, with maximum of 15 words, including articles, prepositions and conjunctions. Only the first letter of the first word must be capitalized. However, when the title has a subtitle, i.e., followed by colon (:), the first letter of the first word of the subtitle (to the right of the colon) must be capitalized. The title must not include the words effect, evaluation, influence or study.

b) Name(s) of the author(s):

- The manuscript file sent in the submission must not contain the name(s) of the author(s) or the identification of the institution(s), because this file will be made available to the reviewers in the system, ensuring blind peer evaluation. However, the name(s) of the author(s) will be informed to the system by the corresponding author during the submission. The corresponding author must already be registered as author in the SciELO Publication system before beginning the submission process. It is necessary that the corresponding author defined his position in the authorship of the article in relation to the other authors.

- The manuscript can have a maximum of six authors.

- In relation to the content of the first version of the manuscript submitted to the Journal, later changes in the sequence or names of the authors will not be allowed.

c) Abstract: maximum of 250 words with no abbreviations. The decimal mark of the numbers must be indicated by a period (.), instead of a comma (,).

d) Keywords: minimum of three and maximum of five, not included in the Title, separated by commas and with only lowercase letters.

e) Title in Portuguese: the same standardization of the title in English.

f) Resumo: maximum of 250 words, an exact translation of the Abstract. The decimal mark of the numbers must be indicated by a comma (,), instead of a period (.).

g) Palavras-chave: the same standardization of the Keywords, and an exact translation of this item.

h) Introduction: the relevance of the study must be highlighted, including through literature review, in a maximum of 1 (one) page. The Introduction must not have equations, tables, figures or basic theoretical text on a specific subject; instead, there should be a text referring to research results. The last paragraph must present the objective of the study.

i) Material and Methods: it must provide indispensable information that allows the replication of the research by other researchers.

j) Results and Discussion: the obtained results must be discussed and interpreted based on the literature. Tables and figures must not present the same results.

k) Conclusions: must be numbered and written succinctly, i.e., with no comments or additional explanations, based only on the presented results and with no abbreviations.

l) Acknowledgments (optional)

m) Literature Cited:

- The submitted manuscript must have at least 70% of journal citations, with a minimum of 40% from the last eight years.

- Bibliographic citations such as “apud” or “cited by” will not be accepted, i.e., citations must be only of the original references.

- Citations of in-press articles, personal communications, folders, handouts, monographs, final course assignments, technical reports and works published in congresses are not accepted in the elaboration of the manuscripts. Congress works will only be accepted if there are no journal publications on the topic.

- In certain contextualization, the citation of more than one bibliographic reference should first follow the chronological order and, then, the alphabetical order of the authors; in the citation of more than one bibliographic reference of the same authors, his/her name must not be repeated; however, the publication years must be separated by a comma.

- The manuscript must have a maximum of 30 bibliographic references. For the contribution in the modality of Literature Review, there is no maximum limit for the number of bibliographic references.

Manuscripts in English must also contain the items Title, Abstract and Key words in Portuguese, and these items must come first in the main language.

The contribution in the form of Literature Review must have the following sequence: Title, Abstract, Keywords, Title in Portuguese, Resumo, Palavras-chave, Introduction, Items on the reviewed topics, Conclusions and Literature Cited.

Text editing

a) Word of Microsoft Office 2010: The manuscript must be edited only in this version of Microsoft Word.

b) Text: font Times New Roman, size 12. The text must not contain bold or italic words, except for the title, items and sub-items, which must be in boldface, and the scientific names of plant and animal species, which must be in italic. Equations, tables and figures must not contain italic or bold words. The equations should be written using the software MS Equation. Long paragraphs should be avoided and, preferentially, paragraphs must have a maximum of 60 words.

c) Spacing: the text must be double-spaced in the entire manuscript.

d) Paragraph: 0.5 cm.

e) Page: size A4, portrait orientation, top and bottom margins of 2.54 cm and left and right of 3.00 cm, with a maximum of 20 pages, including tables, figures and the cited literature. Pages and lines must be numbered; line numbering must be continuous, i.e., continuing from the previous to the next page.

f) All the items must be capitalized, in boldface and centered, except **Resumo**, **Abstract**, **Palavras-chave** and **Keywords**, which must be aligned to the left, with only the first letter capitalized. The sub-items must be aligned to the left, in boldface, with only the first letter capitalized.

g) Units must be expressed in the ISU (International System of Units) and the scientific terminology must follow the international conventions of each area.

h) Tables and Figures (graphs, maps, images, photographs, drawings):

- Tables and figures must be self-explanatory and have width of 8,75 or 18 cm, with font Times New Roman, size 9, and inserted right below the paragraph in which they were cited for the first time. Examples of citations in the text: Figure 1; Table 1. Tables and figures with virtually the same title must be grouped in one single table or figure, creating, however, an indication of differentiation. The indicating letter of each subfigure in a grouped figure must be capitalized and followed by a period (Example: A.), placed in the upper left corner of the figure. Grouped figures must be cited in the text as follows: Figure 1A; Figure 1B; Figures 1A and B. Tables and figures with width of 18 cm will exceed left and right margins of 3.0 cm, which is not a problem.

- Tables must not contain vertical dashed lines and should have the minimum possible of horizontal dashed lines. Numbers in the columns must be aligned by the last digit. Example of the title, which must be above the table: Table 1. Selected INMET stations (without a period at the end). In tables with comparison of means, according to statistical analysis, there must be a space between the number (mean) and the letter. Units must appear in parentheses.

- Figures must not contain borders, and the curves (in case of graphs) must have a width of 0.5 pt. Figures can be in color, but always using different data markers, because labels based only on colors will disappear when photocopied. Example of the title, which must be below the figure: Figure 1. Accumulated soil loss as a function of the application time of simulated rain (without a period at the end). In order to avoid redundancy, figures must not contain the data presented in tables. If the title and the numbering of axis X and/or Y are equal in grouped figures, only one centered title must be used, with the numbers in only one axis. Graphs, diagrams (curves in general) must come as a vector image. Bitmap figures must have a minimum resolution of 300 bpi. The authors should ensure the quality of resolution,

aiming at a good comprehension of the figures. The units in figure axes must be in parentheses, without being separated from the title by a comma. The manuscript must not contain figures with curves for r^2 lower than 0.60; in these cases, only the equation and the respective r^2 value must be presented in the manuscript.

Examples of citations in the text

- a) When the citation has only one author: Zonta (2010) or (Zonta, 2010).
- b) When the citation has two authors: Mielniczuk & Tornquist (2010) or (Mielniczuk & Tornquist, 2010).
- c) When the citation has more than two authors: Pezzopane et al. (2010) or (Pezzopane et al., 2010).
- d) When an institution/company is the author of the article, the citation must be of its abbreviation, in uppercase letters. Example: EMBRAPA (2010).

List of the Literature Cited

The bibliographic references cited in the text must be arranged in a list in alphabetical order, by the last name of the first author, in an increasing chronological order, with the names of all the authors. Format examples are provided below:

a) Books

Paz, V. P. S.; Oliveira, A.; Pereira, F. A.; Gheyi, H. R. Manejo e sustentabilidade da irrigação em regiões áridas e semiáridas. 1.ed. Cruz das Almas: UFRB, 2009. 344p.

b) Book chapters

Antuniassi, U. R.; Baio, F. H. R. Tecnologia de aplicação de defensivos. In: Vargas, L.; Roman, E. S. Manual de manejo e controle de plantas daninhas. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. Cap.5, p.173-212.

Gee, G. W.; Bauder, J. W. Particle-size analysis. In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis - Part 1: Physical and mineralogical methods. Madison: Soil Science Society of America, 1986. Cap. 16, p.383-411.

c) Journals

Silva, V. G. de F.; Andrade, A. P. de; Fernandes, P. D.; Silva, I. de F. da; Azevedo, C. A. V.; Araujo, J. S. Productive characteristics and water use efficiency in cotton plants under different irrigation strategies. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.451-457, 2010.

d) Dissertations and theses

Paixão, F. J. R. da. Doses de nitrogênio e conteúdo de água do solo no cultivo da mamoneira, variedade BRS Energia. Campina Grande: UFCG, 2010. 76p. Tese Doutorado

e) Works presented in congresses (Annals, Abstracts, Proceedings, Diskettes, CDROM)

Centeno, C. R. M.; Azevedo, C. A. V.; Santos, D. B. dos; Lira, V. M. de; Lima, V. L. A. de. Coeficiente de cultivo da mamona BRS energia irrigada com diferentes níveis de água salina. In: Congresso Latino-Americano e do Caribe de Engenharia Agrícola, 9, e Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 39, 2010, Vitória. Anais... Jaboticabal: SBEA, 2010. CD Rom.

For CD-ROM, the title of the publication will still be Annals, Abstracts or Proceedings, but the number of pages will be replaced by the word CD-ROM. For online journals, there should be no information of the webpage address, according to the example above (Item C).

f) Software References

SAS - Statistical Analysis System. User's guide statistics. 9.ed. Cary: SAS Institute, 2002. 943p.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <<https://www.rproject.org/>>. Acesso em: Nov. 2018.

g) Other reference formats

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists. 17.ed. Washington: AOAC, 2000. 1018p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.300p. Drainage and Irrigation Paper, 56

Brasil. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Regras para análise de sementes. Brasília: MAPA, 2009. 399p.

The references that have the same authors and are of the same year, must be identified after the year, by the letters a, b, etc.

Further information on standardization of manuscripts

a) Do not use a period after palavras-chave, keywords and titles of tables and figures.

b) In the description of the parameters and variables of an equation, a hyphen (-) must separate the symbol from the description, and a semicolon (;) must be used at the end of each description, with a period (.) after the last one. The number of an equation must be in parentheses and aligned to the right: example: (1). The equations must be cited in the text, according to the following examples: Eq. 1; Eqs. 3 and 4.

c) All the letters in an abbreviation must be capitalized; however, in the full name of an institution, only the first letter of each word must be capitalized. d) In the following examples of text citations of numerical values, the correct format is placed on the right side of the equal sign:

10 hours = 10 h; 32 minutes = 32 min; 5 liters = 5 L; 45 milliliters = 45 mL; 1/s = L s⁻¹; 27°C = 27 °C; 0.14 m³/min/m = 0.14 m³ min⁻¹ m⁻¹; 100 g of weight/bird = 100 g of weight per bird; 2 tons = 2 t; 2 mm/day = 2 mm d⁻¹; 2x3 = 2 x 3 (it must be separated); 45.2 - 61.5 = 45.2-61.5 (it must be united).

The % is the only unit that must be close to the number (45%). When there is a sequence of numerical values with the same units, the unit must follow only the last value. Examples: 20 m and 40 m = 20 and 40 m; 56.1%, 82.5% and 90.2% = 56.1, 82.5 and 90.2%.

e) When pertinent, numerical values in the text, tables and figures should have a maximum of two decimal places.

f) The titles of the listed bibliographies must have only the first letter of the first word capitalized, except for proper names. The title of events must have only the first letter of each word capitalized.

Steps for online manuscript submission

Manuscripts can only be submitted online, through the SciELO Publication System (www.submission.scielo), following the five steps described below:

1° SUBMISSION STEP: START SUBMISSION

In this step will be provided information about: section in which the manuscript fits; Language of submission; conditions for submission (verification of the norms of the Journal); copyright statement; privacy policy; and editor comments (optional).

2° SUBMISSION STEP: MANUSCRIPT TRANSFER

In this step, the file of the submitted manuscript, which must not contain the names of the authors or their institutional and e-mail addresses, will be transferred.

3° SUBMISSION STEP: INCLUSION OF METADATA (INDEXING)

In this step the following information should be provided: authors; title and abstract; indexation; contributors and granting agencies.

4° SUBMISSION STEP: TRANSFER OF SUPPLEMENTARY DOCUMENTS

In this step, the file referring to the agreement of the authors on the manuscript submission will be transferred, which corresponds to the agreement statement following the template provided by the Agriambi Journal (www.agriambi.com.br), as well as sending the file of the proof of payment of the submission fee. Statements of agreement on manuscript submission with scanned signatures will not be accepted. If these files were not sent, the submission will later be canceled in the system.

At no time, ie during the process of submission and processing of the article, the corresponding author should allow, in the SciELO Publication system, the availability of additional documents to the reviewers, in order not to compromise the blind peer evaluation.

5° SUBMISSION STEP: CONFIRMATION

In this step the submission will be completed.

Procedures for manuscript analysis

a) Considering the demand and the publication capacity of the Journal, only part of the manuscripts submitted each month is selected by the Editorial Team for analysis, based on the criterion of relative relevance. For manuscripts not selected for analysis, there will be no reconsideration of this decision, but they can be submitted again. For the selected manuscripts, the corresponding author will be requested to provide the receipt of payment of the processing fee and the indication of three Brazilian reviewers and three foreign reviewers. These files should be sent through the SciELO Publication System, as supplementary documents. After receiving these files, the manuscript is sent to the reviewers for blind analysis (without identification of the authors). For any information on the course of the manuscript requested to the Journal Secretariat, authors must provide its identification number, generated by the SciELO Publication system.

b) The criteria to be judged by the reviewers in the manuscript are as follows: pertinence of the subject for publication in the Journal; relevance of the scientific contribution of the manuscript; adequacy of the title to the objectives of the work; understandable language of the manuscript; methodology used consistent with the proposed objectives; results discussed and interpreted appropriately in the light of the literature; succinct conclusions and in accordance with the results and objectives of the work; and updating and quality of bibliographic references.

c) With the help of the reports and suggestions from the Ad Hoc Reviewers about the first version of the manuscript, the Editorial Team can reject it or request the author(s) a second version, which will be analyzed again, both by Ad Hoc Reviewers and the Editorial Team. In its second version, the manuscript can be rejected, accepted and/or returned to the author(s) for a third version.

d) At first, the correction recommendations from Ad Hoc Reviewers and the Editorial Team on the text of the manuscripts must be incorporated by the author(s); however, the author(s) has(have) the right to not accept them, through an explicit justification, which will be analyzed by the Reviewer(s) and the Editorial Team. The justification for not accepting the correction recommendations should be inserted at the beginning of the Word file of the new version of the article, referring to the respective reviewer or to the Editorial Team.

e) For rejected manuscripts, a reconsideration request can be made by the corresponding author, within a maximum period of ten days from the receipt of the e-mail communicating the manuscript rejection. The Editorial Team will send the reconsideration request to the respective reviewer for analysis.

f) Upon manuscript acceptance, if necessary, complementary information will be requested to the corresponding author. Then, the author will receive the manuscript in .pdf format, for a final review, and must inform the Editorial Team about any eventual correction or alteration.

g) After publication, any error found by either authors or readers, when communicated to the Editorial Team, will be corrected in an errata section in the next issue of the Journal.

h) The Editorial Team works to reach standard time to complete an evaluation, between 6 and 8 months.

Fees charged

The Agriambi journal has the following fees:

Submission fee: R\$ 60.00 (sixty reais) - Payment upon submission of the article.

Processing fee: R\$ 140.00 (one hundred and forty reais) - Payment on the occasion of the article notice selected for evaluation by the reviewers.

Publication fee: R\$ 40,00 (forty reais) per page of Word in double space between lines - Payment on the occasion of the acceptance notice of the article for publication.

The payment of submission and processing fees does not guarantee acceptance of the article for publication in the Journal and, in case of non-acceptance, the said fees will not be returned.

The payment of these fees must be made through deposit into the account Banco do Brasil, Agência 1591-1, Account 34.849-X, Favored: Fundação Parque Tecnológico da Paraíba (CNPJ 09.261.843 / 0001-16).

Further information

a) Authors will have a maximum time limit of ten days to return the corrected manuscripts, counting from the receipt of the e-mail requesting the corrections. Failure to meet this deadline will automatically result in the cancelation of the manuscript.

b) The topics, data and concepts published in the Journal are of exclusive responsibility of the authors. The eventual citation of products and commercial brands does not mean recommendation of use on the part of this Journal. The reproduction of published articles is allowed, provided that the source is cited.

c) The Agriambi Journal adopts, as a standard of attribution of open access to the manuscripts, the CC-BY license, which maximizes the dissemination of the manuscripts and is, therefore, internationally adopted by the main open-access journals and publishers. More detail can be obtained at: <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/br/>.

d) Contact address

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental

Universidade Federal de Campina Grande

Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, Bloco CM, 1º andar

CEP 58429-140, Campina Grande, PB

Fone: 83 2101 1056, www.agriambi.com.br

www.scielo.br, revistagriambi@gmail.com

ANEXO B – NORMAS DA REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

1. General guidelines

Manuscripts may be submitted in English, Portuguese or Spanish. The text should be sent through the ScholarOne system by accessing the address (<https://mc04.manuscriptcentral.com/eagri-scielo>). The Editorial board checks the text for plagiarism, scope and format. Each article is submitted to at least three reviewers.

By submitting the manuscript, the corresponding author should fill in the system form with all the require information, including ORCID (see how to create in <https://orcid.org/>), and also send a message to contato.sbea@gmail.com assuming responsibility for the other authors, if any, as co-responsible for the scientific content of the article, according to Article 5 of the Brazilian Law No. 9610/98, which treats of the Copyright Law (please see item 4, at the end of this topic).

The authors should see also COPE (Committee on Publication Ethics, <http://publicationethics.org>) guidelines in their endeavor to preserve and promote the integrity of the scholarly record through policies and practices that reflect the current best principles of transparency and integrity, by prevention of plagiarism, malpractice, fraud and possible ethical violations.

The correspondent author should also send to contato.sbea@gmail.com a declaration form stating that the article sent to Engenharia Agricola have not been submitted for publication to another agency, nor have been previously published, except in abstract form at scientific meeting (please see the form in item 4, at the end of this topic).

2. Translation and review

Once accepted, the articles submitted in Portuguese and Spanish should be translated into English by companies indicated by the Editorial Board. Manuscripts submitted in English should be revised by those companies. The recommended translator or reviewer companies are:

- Academic Editing Service (<http://www.academic-editing-services.com>)

- American Journal Experts (<https://www.aje.com/en/services/translation>)
- Elsevier (<http://webshop.elsevier.com/languageservices/>)
- Editage (<https://www.editage.com.br/>)
- Enago (<https://www.enago.com.br>)
- Proof-Reading-Service.com Ltda (<https://www.proof-reading-service.com/>)
- STTA - Serviços Técnicos de Tradução e Análises (<http://www.stta.com.br/>)
- Write Science Right (<http://www.writescienceright.com/>)

The translation of the articles submitted in Portuguese and Spanish and the review of the articles submitted in English will be paid by the author directly to the companies indicated by the editorial committee.

3. Guidelines for manuscript preparation

3.1. Configuration

- Manuscripts should have no more than five authors.
- Suppress author names and affiliation;
- Color figures are allowed (photos, graphs, diagrams, etc) limited to 2.0 Mb;
- Measurement units should follow the International Unit System <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/pml/div684/fcdc/sp330-2.pdf> ;
- Processor: MSWord 7.0 or later
- Paper size: A4 (21 x 29.7 cm)
- Maximum number of pages: 20
- Line Spacing: 2
- Font for the text: Times New Roman 12
- Font for the header / footnote: Times New Roman 9
- Margins: 2 cm on all sides of the paper
- Number lines on the pages: file / page setup / layout / number of lines / numbering lines /continuous
- Paragraph: 1.0 cm
- Maximum file size: 2.0 Mb
- Identification of the authors: upon advised on the acceptance of the article, the corresponding author shall submit to ScholarOne system a document containing: final manuscript title, followed by the full names of authors in the same order of publication.

Authors should be the same as those registered in the system at the time of submission. They cannot be changed, except with express written consent of each of the original authors. Each name must be followed by a superscripted numbers in a sequence. Below the corresponding author's name, separated by double space, his affiliation and email address shall be included, and, for the remaining authors, only the institution is required.

3.2 Category

The manuscripts can be Scientific article, Technical article, and Review article.

3.2.1 Scientific Article

Scientific articles refer to reports of original research, with a well-defined hypothesis and innovation issues. The text should include the items, always highlighted in capital letters and bold unnumbered paragraph and, leaving two spaces (ENTER twice) after the previous item and a space (ENTER once) to begin the text, in the following order: Title, name of the authors, abstract, keywords, Material and methods, Results, Conclusion, Acknowledgments and References.

Title: Centralized, should be clear and concise, allowing prompt identification of the content of the study, trying to avoid words like: analysis, study and evaluation.

Abstract: The text, containing a maximum of 14 lines, should start on the same line of the item, be sufficiently clear to be presented alone and include five points: 1) Justify (1 or 2 sentences) – why the research was considered necessary?, 2) Objectives (1 sentence) – what was done to achieve the need for research, 3) Methods (up to 3 sentences) – a brief summary of what and which parameters were measured, 4) Results (up to 5 sentences) – what was found? , 5) Conclusions/recommendations (1 sentence) – what should be done in response to those findings. Below should appear the keywords (six at most, trying not repeating the title) written in lowercase.

Introduction: Should be concise, in at most 50 lines, using recent literature (preferably peer reviewed articles published over last 5 years) and appropriate to formulate the problems addressed and the justification of the importance of the subject. On the last paragraph, the weak points of the reviewed literature should be clearly mentioned, pointing what is missing and describing what is novel in the proposal research that makes the article deserve to be published in *Engenharia Agricola*.

Material and methods: Depending on the nature of the study, a characterization of the experimental area must be inserted, making clear the conditions under which the research

was conducted. When the public domain methods are used only the reference will be sufficient, otherwise is required description of the procedures used, adjustments promoted, etc. Measurement units and symbols should follow the International System.

Results and discussion: The results should be compared with those of the literature presented in the Introduction and with others pertinent to the field of work, and discussed in the light of established knowledge, agreeing or disagreeing with scientific or technical explanations, but highlighting the importance and originality of such data. The wording of this item should be elaborated not only by reporting that the results obtained agree with or disagree with the results obtained by other researchers, but also, in a clear and concise way, seek to explain why the results were those and why they agree or disagree with the results presented in the literature.

Conclusions: These should be based exclusively on the results of the study. Avoid repetition of results in subsequent listing, confronting what was obtained with the goals initially set. The conclusions should be written to facilitate interpretation of the article, without consulting other items of it.

Acknowledgments: Enter it, if any, after conclusions, succinctly.

References: Should be mentioned only the essential related to the manuscript, including only those mentioned in the text and tables, graphs or illustrations, appearing in alphabetical order and in lowercase letters. Avoid quoting abstracts, unpublished articles and personal communication. At least 50% of the references should be in the last 5 years and 90% of periodic articles.

Exceptional cases should be justified and will be reviewed by the Editorial Committee. The references in the text must also appear in capital letters, followed by the date:

Souza & Silva (2005), or (Souza & Silva, 2005); existing other references of the same author in the same year (other publications), it will be identified with lowercase letters (a, b, c) after the year of publication: Souza & Silva (2005 a). For three or more authors, in the text will be quoted only the first author followed by et al., but in the final bibliography list other names should also appear. In quotation from quotation (to be avoided), identifies the directly consulted article, the author and / or the article mentioned in it as indicated: Silva (2000) cited by Pessoa (2006). Following are some examples:

Journals

Pruski FF, Rodrigues RG, Pruski PL, Nunes AA, Rego FS (2016) Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. *Engenharia Agricola* 36(5):830-838.

With DOI (Digital Object Identifier)

Pruski FF, Rodrigues RG, Pruski PL, Nunes AA, Rego FS (2016) Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. *Engenharia Agricola* 36(5):830-838.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430- Eng.Agric.v36n5p830-838/2016](http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p830-838/2016)

Books

Complete book, authored

Keller J, Bliesner RD (2012) *Sprinkle and Trickle Irrigation*. New York, Springer. 652p.

Complete book, only specific pagination (preferred form) Keller J, Bliesner RD (2012) *Sprinkle and Trickle Irrigation*. New York, Springer, p140-160.

Book with institutional author

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) *The state of food and agriculture: climate change, agriculture and food security*. Rome, FAO, 190p.

Book with institutional author, only specific pagination (preferred form)

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) *The state of food and agriculture: climate change, agriculture and food security*. Rome, FAO, p50-60.

Complete book, edited

Mueller T, Sassenrath GF (2015) *GIS Applications in Agriculture. Volume Four: Conservation Planning*. Boca Raton, CRC Press, v4:304p. DOI: 10.1201/b18173

Complete book, edited, only specific pagination (preferred form)

Mueller T, Sassenrath GF (2015) *GIS Applications in Agriculture. Volume Four: Conservation Planning*. Boca Raton, CRC Press, v4: p28-49. DOI: 10.1201/b18173-1

Book chapter or an article within a book

Buckleiter GW (2007) Irrigation system automation. In: Adamsen F, Hook J, Cardon G, Letey J, Lascano RJ, Sojka RE. *Irrigation of agricultural crops*. Madison, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, p181-194.

Annals of congress, simposiums, workshops (to be avoided)

Hagel H, Hoffmann C, Doluschitz, R (2014) Mathematical programming models to increase land and water use efficiency in semiarid NE-Brazil. In: World Conference in Computers in Agriculture. San Jose, International Commission of Agricultural Engineering, Proceedings...

Thesis (to be avoided)

Schiavone DF (2016) heat mass transfer in ballet switch grass for storage and bioconversion applications. PhD Thesis, Lexington University of Kentucky, College of Engineering.

Cartographic documents (map, aerial photography, satellite image, etc.)

BRASIL e parte da América do Sul: mapa político, escolar, rodoviário, turístico e regional. São Paulo: Michalany, 1981. 1 mapa, color., 79 cm x 95 cm. Escala 1:600.000.

Patents

Norman LO (1998) Lightning rods. US Patent 4,379,752, 9 Sept 1998.

Online documents

Doe J (1999) Title of subordinate document. In: The dictionary of substances and their effects. Royal Society of Chemistry. Available : <http://www.rsc.org/dose/title of subordinate document>. Accessed Oct 19, 2016.

Figures and tables. Illustrations, graphics and photographs must be submitted with sufficient detail and size for the final composition, preferably in the same position of the text, could be colored and must also present the title in English. Graphics: may have colored parts, and the x and y axes with 1/2 pt, described with the same type and size of letters in the text (Times New Roman 12) and the legend in the lower position of it. They must be numbered in consecutive Arabic numerals. Tables: avoid extensive tables and unessential data, privileging average data; adapt their sizes to the usable space of the paper and place, wherever possible, only continuous horizontal lines, their captions should be concise and self-explanatory and should also display the title in English. Photographs: can be colored. In the discussion, compare the results with the data obtained in the Bibliography.

Equations: All equations that are part of the text should be aligned with the paragraph and numbered as follows:

$$y = ax + b \quad (1)$$

in which

y - speed m s⁻¹;

a - angular coefficient;

x - speed, rpm;

b - linear coefficient.

3.2.2. Technical Article

Should include advances in theories, methodologies and techniques, without a hypothesis presentation. When dealing with a case study, the conclusions should present proposals. It should be written in technical language, easy to understand, on matters of interest to the Agricultural Engineering by author(s) showing experience on the subject dealt, allowing guidance to the different users of Agricultural Engineering. It only justifies submitting articles that bring contribution on the subject and not just personal cases or restricted interest. With freer style than in scientific articles, technical articles should, in most cases, include the following items: Title, Author(s), Abstract, Abstract, Keywords, Introduction, description of the subject, 6 Conclusions and References. The text of the technical articles should follow the same guidelines for scientific articles, with the following particular remarks:

Header: TECHNICAL ARTICLE should appear in the header of the first page, in capital letters, underlined, in bold, centered and spaced 1.1 cm from the top edge.

Introduction: should contain brief background, explaining the importance, the current status of the subject, relying on literature review, and make clear the aim of the article.

Subject description: with different titles that can be divided into sub-items, the matter should be discussed, pointing up the theoretical basis, bringing experiences and recommendations, discussing and criticizing situations, based on the fullest bibliography and technical standards on the subject.

Conclusions: When appropriate, should be written in a clear and concise manner, consistent with the goal established. Should not be a simple resubmission of other paragraphs of the article.

3.2.3. Review Article

It is the presentation, exclusively by a request of the Editorial Committee, of a study by gathering, analyzing and discussing an issue of importance to the Agricultural Engineering, and based on extensive literature search, allowing compilation of existing knowledge. Although with more stylistic freedom than in scientific articles, review articles should contain the following items: Title, Author(s), Abstract, Keywords, Introduction, Review,

Conclusions and References. The writing of these items should follow the same guidelines described for scientific articles, with the following particular remarks:

Header: REVIEW ARTICLE should appear on the front page headline in capital letters, underlined, in bold, centered and spaced 1.1 cm from the top edge.

Introduction: should contain brief background, placing the importance, the current status of the subject and purpose of the review.

Review: follow the standards of the journal citation. If necessary, it can be divided by subjects in sub items. The essay should be critical and not just mere exposure of the issues; it must present a logical sequence in order of subjects and / or chronological. Whenever possible, should contain an analysis of comparative studies on the subject dealt.

Conclusions: should be presented clearly and concisely, consistent with the goals established. It should not be a simple restatement of paragraphs of the review.

4. Responsibility and declaration of originality

The following statements that the corresponding author should fill in and send to contato.sbea@gmail.com at the time of submission of the manuscript.

I, " _____", am aware of my authorship of the manuscript entitled " _____", and I assume responsibility for the other authors listed below regarding the authorship of the manuscript submitted to Engenharia Agrícola, in accordance to Article 5 of Law 9,610, which deals with Copyright.

Authors:

_____, _____, _____, _____.

I declare that the article _____ is of a scientific and original nature and has not been submitted to another journal, either in whole or in part. I further declare that once published in Engenharia Agrícola, it will never be submitted by me or by other authors to any other journal. Through this instrument, in the authors, we assign the copyright of the aforementioned Article to Engenharia Agrícola, pursuant to article 5 of Law 9,610, which deals with copyright.

SUBSCRIPTION

Engenharia Agrícola is published under the Open Access model and is therefore free for anybody to read and download, and to copy and disseminate for academic, scientific, educational and extension purposes.

The online journal is free and open access.

All the content of the journal, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons License