

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**ANISOTROPIA ESPACIAL DA PERDA DE SOLO E
ATRIBUTOS DO SOLO EM DIFERENTES PEDOFORMAS
COM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Kátia Noronha Barbosa

Engenheira Ambiental

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

ANISOTROPIA ESPACIAL DA PERDA DE SOLO E
ATRIBUTOS DO SOLO EM DIFERENTES PEDOFORMAS
COM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Kátia Noronha Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso

Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Bordonal

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2020

B238a	Barbosa, Kátia Noronha Anisotropia espacial da perda de solo e atributos do solo em diferentes pedoformas com cultivo de cana-de-açúcar / Kátia Noronha Barbosa. -- Jaboticabal, 2020 46 f. : il., tabs., mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Alan Rodrigo Panosso Coorientador: Ricardo de Oliveira Bordonal 1. Superfície côncava. 2. Superfície convexa. 3. Dimensão fractal. 4. Dependência espacial. 5. Conservação do solo. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANISOTROPIA ESPACIAL DA PERDA DE SOLO EM PEDOFORMAS COM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTORA: KÁTIA NORONHA BARBOSA

ORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

COORIENTADOR: RICARDO DE OLIVEIRA BORDONAL

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI (VIDEOCONFERÊNCIA)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos-FEIS / Ilha Solteira/SP

Jaboticabal, 07 de fevereiro de 2020

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

KÁTIA NORONHA BARBOSA – Filha de Raimundo Ciro Noronha e Dora Lúcia Noronha nasceu em Belém, Pará, no dia 24 de dezembro de 1983. Em fevereiro de 2013, ingressou no curso de Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual do Pará – UEPA. Iniciou em fevereiro de 2018 o Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. No mês de fevereiro de 2020, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia.

“A sabedoria começa com a dúvida”

(Freud)

DEDICO

Primeiramente a Deus, ao meu esposo Sandro e às minhas filhas Sophia, Mila e Maitê pelo infinito amor;

E, às mulheres que não abrem mão da realização profissional e ao mesmo tempo, priorizam o que podemos ter de mais importante: a família e em especial os filhos.

OFEREÇO

In memoriam ao meu amado pai Raimundo
Ciro de Azevedo Noronha pelos
ensinamentos e simplicidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por conceder-me a sabedoria necessária para conciliar o serviço público, os trabalhos acadêmicos e a família.

Aqueles que foram fundamentais para essa conquista na minha vida, meu marido Sandro e sogra Ray que sempre estiveram junto comigo em minha jornada contribuindo dia após dia.

Às minhas filhas Sophia, Mila e Maitê pela paciência, compreensão e amor que transmitem e motivam a minha caminhada. E a minha Mãe Dora, meu irmão Kaiky e minha mãe velha (avó) que mesmo longe estão sempre rezando e torcendo por mim.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso que através da sua experiência e competência contribuiu para a minha formação acadêmica e o desenvolvimento desta pesquisa com entusiasmo para disseminar o seu imenso conhecimento.

Aos Professores Dr. Marcílio Martins Filho, Prof. Dr. Gener Tadeu, Prof. Dr. José Marques Júnior pelos ensinamentos teóricos e imensas contribuições no decorrer da minha trajetória acadêmica.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Câmpus de Jaboticabal e ao Grupo de Pesquisa CESME pela oportunidade de realização de estágio onde foram gerados os dados desta Dissertação.

Ao grupo de pesquisa CSME, em especial a Ludhanna Veras, Maria Elisa, Paulo, João, Kleve que através da amizade e estudos fizeram os dias de trabalho melhores e que muito contribuíram nessa fase com suas experiências.

Ao Instituto Federal do Pará Campus Rural de Marabá pela realização do Programa de mestrado Institucional – MINTER, que promove a qualificação profissional do servidor público.

E, finalmente, a todos os amigos e familiares que de alguma forma contribuíram em determinada fase da minha trajetória, o meu muito obrigada!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DAS ABREVIACÕES	iv
LISTA DE QUADROS.....	v
LISTAS DE FIGURAS	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Perda de solo na Agricultura.....	3
2.2 Dinâmica dos fatores de erosão.....	4
2.3 Anisotropia da perda de solo.....	6
2.4 Geoestatística	7
2.5 Variograma.....	8
2.6 Estimação linear- krigagem.....	9
2.7 Dimensão Fractal.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1 Estatística descritiva da Perda de solo, atributos químicos e físicos do solo nas pedoformas côncava e convexa.....	17
4.2 Geoestatística da Perda de solo, atributos químicos e físicos do solo nas pedoformas côncava e convexa.....	18
4.3 Dimensão Fractal (D_F) de perda de solo e demais atributos químicos e físicos do solo.....	19
5. CONCLUSÕES	25
6. REFERÊNCIAS	26

ANISOTROPIA ESPACIAL DA PERDA DE SOLO E ATRIBUTOS DO SOLO EM PEDOFORMAS DE CULTIVO COM CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – O estudo da anisotropia espacial apresenta grande importância na modelagem e mapeamento espacial das variáveis ambientais. Assim, o objetivo do trabalho foi caracterizar a anisotropia espacial da perda de solo e atributos químicos e físicos do solo em diferentes pedoformas com cultivo de cana-de-açúcar, por meio da utilização da dimensão fractal (D_F). O estudo foi realizado a partir de um banco de dados legados do Grupo de Pesquisa CSME, referente a uma área de 200 ha, localizada em Tabapuã (SP), Brasil, onde foi estabelecida uma malha de amostragem regular de 50 m, com 623 pontos. Em cada ponto, foi estimada a perda de solo por erosão (A), com a Universal Soil Loss Equation (USLE), bem como os atributos teor de argila (Arg), Areia Total (AT), Capacidade de troca de cátions (CTC), Matéria orgânica (MO) e Fósforo (P). Identificou-se a predominância de condição anisotrópica para todos os atributos na pedoforma convexa nas direções entre 90° e 150°, baseadas nos gráficos de dispersão gerados a partir de diferentes escalas e direções. Porém na pedoforma côncava A, Arg e CTC apresentaram comportamento isotrópico. Obteve-se o melhor ajuste no resultado da validação cruzada de A, na pedoforma côncava no modelo isotrópico e na pedoforma convexa no modelo anisotrópico. Concluiu-se que a pedoforma convexa proporciona maior ocorrência de anisotropia demonstrando que a forma do relevo condiciona padrões diferenciados de anisotropia espacial.

Palavras chaves: Superfície côncava, superfície convexa, dependência espacial, dimensão fractal, conservação do solo.

SPACE ANISOTROPY OF SOIL LOSS AND SOIL ATTRIBUTES IN SUGAR CANE CULTIVATION PEDOFORMS

ABSTRACT- The study of spatial anisotropy is of great importance in the modeling and spatial mapping of environmental variables. Thus, the objective of the work was to characterize the spatial anisotropy of soil loss and chemical and physical attributes of the soil in different pedoforms with sugarcane cultivation, using the fractal dimension (DF). The study was carried out from a legacy database of the CSME Research Group, referring to an area of 200 ha, located in Tabapuã (SP), Brazil, where a regular 50 m sampling grid was established, with 623 points. At each point, soil loss by erosion (A) was estimated with the Universal Soil Loss Equation (USLE), as well as the clay content (Arg), Total Sand (AT), Cation exchange capacity (CTC) attributes), Organic matter (MO) and phosphorus (P). The predominance of anisotropic condition was identified for all attributes in the convex pedoform in the directions between 90° and 150°, based on the scatter plots generated from different scales and directions. However, in the concave pedoform A, Arg and CTC showed isotropic behavior. The best adjustment was obtained in the result of the cross-validation of A, in the concave pedoform in the isotropic model and in the convex pedoform in the anisotropic model. It was concluded that the convex pedoform provides a higher occurrence of anisotropy demonstrating that the shape of the relief conditions different patterns of spatial anisotropy.

Keywords: Concave surface, convex surface, spatial dependence, fractal dimension, soil conservation.

LISTA DAS ABREVIACÕES

A – Perda de solo

AT – Areia total

C2dA'a' – Clima megatérmico, sub-úmido chuvoso.

Capes – *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*

CONAB – *Companhia Nacional de Abastecimento*

CTC– *Capacidade de troca de cátions*

CSME– *Caracterização do solo para fins de manejo específico*

CV – *Coeficiente de variação*

D_F– *Dimensão Fractal*

Dr– *Doutor*

EMBRAPA – *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*

MO– *Matéria Orgânica*

MCT – *Ministério da Ciência e Tecnologia*

MEC – *Ministério da Educação*

P – *Fósforo disponível no solo*

Prof – *Professor*

R²– *Coeficiente de determinação*

SP – *São Paulo*

UNESP – *Universidade Estadual Paulista*

USLE– *Universal soilloss equation*

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1 – Estatística descritiva da perda de solo, Atributos químicos e físicos do solo nas pedoformas côncava e convexa na profundidade de 0-0,20 m.....	17
Quadro 2 – Modelos e parâmetros ajustados aos variogramas indicadores para os cenários estudados.....	19

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Ilustração de um típico variograma experimental, com os parâmetros C_0 (efeito pepita), C_0+C (patamar), (a) alcance e modelo ajustado.....	8
Figura 2 – Localização da área de cana-de-açúcar para a determinação de perda de solo.....	12
Figura 3 – Áreas côncava e convexa mostrando os vetores que representam o caminho superficial do fluxo de água.....	13
Figura 4 – Contagem de dimensão fractal significativa em diferentes escalas e direções nas superfícies côncavas e convexas.....	20
Figura 5 – Gráficos polares para dimensão Fractal (D_F) derivada dos variogramas experimentais de A, Argila, AT, CTC, MO e P na escala de 100 m na pedoforma côncava.....	21
Figura 6 – Gráficos polares para dimensão Fractal (D_F) derivada dos variogramas experimentais da A, Argila, AT, CTC, MO e P na escala de 100 m na pedoforma convexa.....	22
Figura 7 – Gráficos de dispersão da validação cruzada na área (a) côncava; (b) convexa	23
Figura 8 – Mapa da área total utilizando o modelo isotrópico para a área côncava e o modelo anisotrópico na área convexa.....	24

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) representa grande importância socioeconômica para o Brasil, pois é a matéria prima para a produção de açúcar e etanol. Na safra nacional 2019-2020, foram processadas 642,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em área colhida de 8,48 milhões de hectares. Desse montante, o estado de São Paulo participou com 53.04%, numa área de 4.302,2 milhões de hectares, e com a produtividade média de 79.231 Kg ha⁻¹ (CONAB, 2019).

A expansão dos canaviais no estado de São Paulo tem ocorrido em áreas impróprias e sem planejamento, em desacordo com a Capacidade de uso do solo, causando grande preocupação no que tange a conservação do solo e da água (Corrêa et al., 2015). Segundo a CONAB (2019) o estado de São Paulo deverá apresentar uma redução de 124 mil hectares de área colhida decorrentes dos processos de erosão nas áreas agrícolas.

O uso intensivo das tecnologias e manejo inadequado no cultivo de cana-de-açúcar tem promovido perda e degradação da camada fértil do solo (Mendonça et al., 2015; Corrêa et al., 2016), que são agravados em áreas com relevo acidentado, sendo um condicionador de processos de drenagem, erosão e deposição de sedimentos (Meireles et al., 2012).

Nesse cenário é importante compreender o comportamento dos atributos do solo para que se possa atuar com o manejo adequado nas áreas agrícolas de acordo com suas especificidades e a geoestatística é uma ferramenta adequada para estimativas baseadas na dependência espacial (Almeida e Guimarães, 2016). E, aliada a dimensão fractal possibilita o uso de aplicações importantes relacionados ao projeto de amostragem, simulação do fluxo de água no solo, bem como o gerenciamento de recursos hídricos agrícolas (Liao et al., 2017).

Estudos em diferentes paisagens mostram que o relevo interfere na variabilidade espacial dos atributos do solo e o entendimento desse fator é de extrema importância no que tange a conservação do solo e da água (Siqueira et al., 2010; Resende et al., 2014). É reconhecido ainda, que a variabilidade na produção de uma cultura está intimamente relacionada com a erosão do solo (Mendonça et al., 2017).

Considerando que os processos erosivos influenciam na variabilidade dos atributos do solo pode-se entender a perda de solo em determinada posição da paisagem como um indicador ambiental de áreas específicas de manejo agrícola e ambiental (Campos et al., 2013).

A Perda de solo (A) tem sido estimada por meio de modelos de predições como a Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier e Smith, 1978) e possibilitado diversos estudos para a identificação de áreas específicas de manejo, práticas de conservação e uso do solo.

O método da dimensão fractal tem sido utilizado para quantificar e integrar fenômenos biológicos, físicos e químicos do solo em diferentes escalas espaciais (Perfect e Kay, 1995), baseado no comportamento fractal dos atributos químicos e físicos do solo que estabelecem dimensões fractais para caracterizar seus padrões espaciais (Keshavarzi et al., 2018).

Uma das aplicações dos fractais no solo é prever a heterogeneidade espacial e identificar a ocorrência de condição anisotrópica, ou seja, direções que condicionam a formação de um determinado processo natural ou antrópico (Berveglieri et al., 2011; Zhang et al., 2018). Estudos têm identificado a influência da anisotropia na heterogeneidade espacial do solo e concluíram que os ajustes dos modelos anisotrópicos apresentam maior acurácia no mapeamento das áreas não amostradas (Guedes et al., 2008; Park et al., 2018).

Nesse sentido, considerando que o padrão espacial da anisotropia da perda de solo está relacionado com o relevo, que por sua vez condiciona a distribuição de vários atributos físicos, químicos do solo os quais apresentam dependência espacial. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a anisotropia espacial da perda de solo em pedoformas com cultivo da cana-de-açúcar, por meio da utilização da dimensão fractal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Perda de solo na Agricultura

Segundo a Organização das Nações Unidas (2019) a erosão é responsável pela perda de 24 bilhões de toneladas de solo fértil por ano, em todo o planeta, reduzindo a produtividade nas áreas agrícolas, a segurança alimentar e a capacidade de armazenamento de água e nutrientes no solo.

A erosão superficial do solo é um fenômeno natural importante para a formação dos processos geológicos, que ocorre de forma lenta e gradual ao longo do tempo e provoca mudanças na paisagem (Borrelli et al., 2017). Todavia, o uso intensivo das tecnologias no manejo principalmente de áreas agrícolas tem promovido a erosão acelerada e intensificado os efeitos externos da transferência de sedimentos sobre a paisagem (Borrelli et al., 2018).

A erosão do solo é definida como o saldo líquido em longo prazo de todos os processos que destacam e removem o solo de sua localização original, e dificultam a prestação dos serviços ecossistêmicos (FAO, 2019). E, a erosão hídrica é uma das principais formas de degradação do solo, responsável por causar o esgotamento de nutrientes nas áreas agrícolas, reduzirem o rendimento da produtividade (Palmer e Smith, 2013).

Além disso, aumenta a poluição e sedimentação em córregos e rios, diminui a capacidade do solo de reter a água, agrava as inundações, diminui a espessura do solo nas regiões de elevada declividade e pode resultar em deposição de solos em áreas de baixas declividades, o solo depositado nessas áreas também pode sofrer maior vulnerabilidade ao transporte por erosão hídrica (FAO, 2019).

A perda de solo tem sido estimada em diversos trabalhos (Martins Filho et al., 2009; Sanches et al., 2009; Barbosa et al., 2015; Mendonça et al., 2017) utilizando-se a Equação Universal de Perda de solo (USLE) (Wischmeier ; Smith, 1978), conforme a (Equação 1):

$$A = RKLSCP$$

Eq. 1

em que, A é perda de solo por erosão hídrica ($t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); R é o fator de erosividade da chuva ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$); K é fator de erodibilidade do solo ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$); LS é o fator para o efeito combinado do declive e do comprimento da rampa (adimensional); C é o fator cobertura e manejo do solo (adimensional); e P é o fator práticas conservacionistas (adimensional).

Estima-se para o Brasil perdas de 616,5 milhões de toneladas de terra ao ano, decorrentes do processo de erosão do solo em lavouras anuais, e custos da ordem de US\$ 1,3 bilhão ao ano (Dechen et al., 2015).

2.2 Dinâmica dos fatores de erosão

A erosão dos solos caracteriza-se por apresentar grande variabilidade espaço-temporal devido à diversidade climática, que influencia no potencial erosivo das chuvas, consequentemente implica na sua susceptibilidade à erosão (Mendonça, 2017).

Os fatores que influenciam nos processos erosivos são erosividade, erodibilidade, relevo, cobertura e manejo do solo, além das práticas conservacionistas.

O fator erosividade (R) é o produto entre a energia cinética (E) e a máxima intensidade de chuva num intervalo de 30 minutos (I_{30}). A taxa de erosão local depende primeiramente da precipitação e do escoamento superficial que transporta o solo erodido, ou seja, a erosividade é a capacidade potencial da chuva em causar a erosão no solo.

A ação erosiva da chuva é moderada pelas condições da superfície do solo, ou seja, a resistência que o solo oferece ao destacamento e transporte, bem como da cobertura vegetal, que diminui o impacto das gotas de chuva no solo (Martins Filho et al., 2009).

O fator Erodibilidade (K) do solo é um parâmetro intrínseco do solo e representa o efeito dos processos de infiltração de água bem como a resistência ao desprendimento e transporte das partículas (Barbosa et al., 2019). O aumento das práticas de preparo do solo diminui o teor de matéria orgânica no solo e degrada a sua estrutura, que causa maior erodibilidade do solo (Martins Filho, 2015).

O fator Cobertura do solo (C) é uma razão entre a perda de solo numa área com específica cobertura e manejo e aquela obtida, em condições, em parcela unitária não padrão ($P = 1$ e $C = 1$) ou padrão ($LS = 1$, $C = 1$ e $P = 1$). Diversos estudos têm sido realizados para avaliar a contribuição da cobertura do solo e do manejo nos processos de erosão na redução de perda de solo e nutrientes, bem como a estabilização progressiva do solo (Martins Filho et al., 2009; Mendonça et al., 2017; Lanzasova et al., 2013).

O fator Relevo (LS) representa a combinação do declive e ângulo de inclinação, o qual descreve o efeito da topografia na erosão do solo. A topografia afeta diretamente o padrão espacial dos processos erosivos, pois quanto maior a inclinação do declive, menor é a taxa de água que infiltra no solo (Sun et al., 2014).

Os processos erosivos tendem a aumentar linearmente com o aumento da inclinação, e à medida que o escoamento se acumula, tem-se o aumento da velocidade do fluxo e do seu poder erosivo (Clubb et al., 2016). Em declives uniformes, o volume de escoamento aumenta ladeira a baixo, já em declives mais complexos, o fluxo diverge de elementos de inclinação convexa e converge em elementos de inclinação côncava, sendo estes declives mais propícios a formação de ravinas.

Onde ocorre diminuição da inclinação, geralmente nas encostas, a quantidade de sedimentos no escoamento é maior que a sua capacidade de transporte, portanto ocorre a deposição dos sedimentos erodidos (Clubb et al., 2016).

O fator (P) é uma razão de perdas do solo, entre uma área com determinada prática de controle de erosão para uma área com rampa preparada no sentido do declive. Assim, nas duas áreas os fatores R, K, LS e C são iguais (Martins Filho, 2015). Este fator representa as práticas de suporte que reduzam os impactos das gotas de chuva, o escoamento superficial e propiciam condições para a infiltração da água no solo.

Projeções sobre a perda efetiva de solo são essenciais para a melhor compreensão sobre a mobilidade dos nutrientes, além dos efeitos resultantes. Neste contexto, a perda de solo por erosão pode ser entendido como um indicador ambiental de áreas específicas de manejo ambiental e agrícola e pode

ser estimada a partir de modelos de predições como a Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier e Smith, 1978).

2.3 Anisotropia da perda de solo

Anisotropia é uma característica frequente nos fenômenos naturais e representa a não homogeneidade direcional de um determinado evento, ou seja, a variabilidade espacial dos elementos ocorre mais intensamente numa direção preferencial (Oliveira et al., 2015). Por exemplo, a formação dos horizontes no solo.

A infiltração de água no solo forma horizontes no solo e os horizontes causam a anisotropia e alteram a direção do fluxo de água no solo (Burt e Trudgill, 1985). Assim, no solo o estudo da anisotropia espacial possibilita identificar não só as direções onde os processos ocorrem como também inferir sobre as possíveis causas desses processos e assim utilizar essas informações como subsídios para a gestão na agricultura de precisão.

A variabilidade espacial de um atributo está relacionada com a distância espacial da amostragem que pode variar com a direção. Se a estrutura de dependência espacial variar em função da distância entre as amostras, o processo que descreve a variabilidade espacial é isotrópico. Mas, se a estrutura diferir em relação à direção, o processo é denominado anisotrópico (Webster, 2014).

A anisotropia geométrica caracteriza-se por dois parâmetros, ângulo e razão da anisotropia. O ângulo de anisotropia é o ângulo de azimuth da direção com maior continuidade espacial, que é o ângulo entre o eixo y e a direção com a faixa máxima. A razão de anisotropia é a razão entre as faixas das direções com maior e menor continuidade ($F_a = a_2 / a_1$). Quando $F_a \approx 1$, existe uma isotropia. Existe uma anisotropia quando $F_a > 1$ (Zhang et al., 2018).

A existência de anisotropia nos fenômenos naturais vem sendo estudada por meio da geoestatística. Diversos estudos concluíram que os ajustes dos modelos anisotrópicos apresentam maior acurácia no mapeamento das áreas não amostradas (Berveglieri et al, 2011; Guedes et al., 2008; Park et al., 2018).

Aliada a geoestatística a Dimensão fractal é uma ferramenta que possibilita prever a heterogeneidade espacial e identificar a ocorrência de

condição anisotrópica, ou seja, direções que condicionam a formação de um determinado processo natural ou antrópico (Berveglieri et al., 2011; Zhang et al., 2018).

2.4 Geoestatística

Ao trabalhar com amostragem existe uma relação de custo e benefício, quanto maior o número de amostras de uma área, mais próxima da realidade serão as estimativas das propriedades em estudo, porém maiores serão os custos. Logo, para se fazer estimativas em locais não amostrados são necessários modelos de comportamento dos fenômenos naturais das variáveis em estudo em determinada área.

Características do meio ambiente, como o solo, são o produto da interação de processos físicos, químicos e biológicos. Fisicamente tais processos são determinados, mas suas interações são tão complexas que as variações parecem ser aleatórias. Esta complexidade impossibilitaria a quantificação desses processos por uma solução determinística ou matemática (Webster e Oliver, 2014).

Para fazer inferências sobre as variáveis aleatórias espaciais são necessárias muitas realizações que são sustentadas pela estacionariedade, ou seja, existe o mesmo grau de variação de lugar para lugar (Matheron, 1965).

Segundo Webster e Oliver (2014), para uma investigação geoestatística bem sucedida é de fundamental importância algumas etapas a serem seguidas: 1) Amostras sem viés, com um mínimo de 100–150 pontos para fornecer estimativas dentro do alcance efetivo esperado; 2) a distribuição marginal de cada variável, identificação de discrepâncias e transformações dos dados para estabilizar variações; 3) cálculo do variograma nos dados brutos ou transformados pelo método dos momentos, ajuste dos modelos plausíveis por aproximação dos mínimos quadrados ponderados em um gráfico do variograma experimental; 4) krigagem em pontos adequado para a aplicação; 5) mapeamento das estimativas de krigagem e suas variações.

Assim, os estudos das relações solo-geomorfologia tem sido uma ferramenta essencial para a definição e aplicação de modelos matemáticos e

computacionais que viabilizem mapas mais acurados na identificação de áreas específicas de manejo, visando à otimização do uso dos recursos ambientais.

Nesse sentido, a Geoestatística surgiu para desenvolver e aplicar modelos que representem os fenômenos naturais cujas propriedades variam conforme a posição dos pontos amostrados no espaço e no tempo.

2.5 Variograma Experimental

O variograma é uma estatística descritiva quantitativa que caracteriza a continuidade espacial de um conjunto de dados. O variograma quantifica a diferença entre pontos e é função da semivariância com o vetor distância, sob as hipóteses intrínsecas e da estacionariedade (Webster; Oliver, 2014), conforme a equação proposta por Matheron (1963):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad \text{Eq. 2}$$

em que, $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância estimada na distância h , $N(h)$ é o número de pares de valores observados $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ separados pela distância h e Z representa os valores medidos para atributos do solo.

Um variograma experimental ideal de um atributo que apresenta dependência espacial é caracterizado por três parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (a). E pode ser representado graficamente conforme ilustrado na Figura 1:

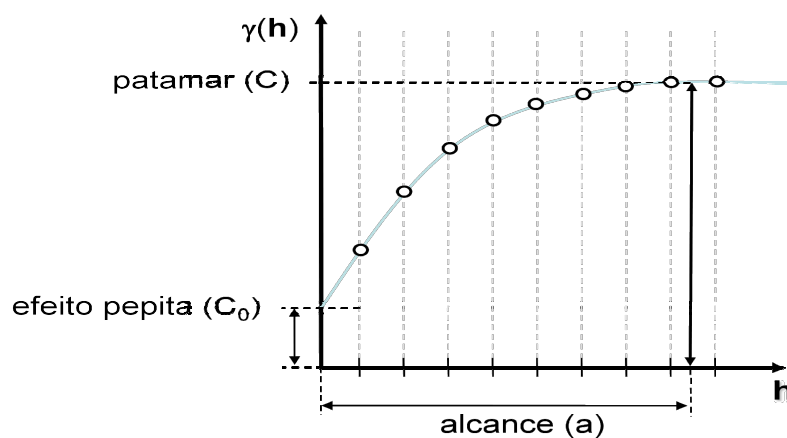


Figura 1 – Ilustração de um típico variograma experimental, com os parâmetros C_0 (efeito pepita), C_0+C (patamar), (a) alcance e modelo ajustado.

O ajuste do modelo teórico do semivariograma, é realizado pelo grau de dependência espacial, de acordo com o proposto por Cambardella et al. (1994), conforme Equação 3:

$$GD = C_0/C_0 + C \quad \text{Eq. 3}$$

em que: GD= grau de dependência espacial; Co= efeito pepita; C= contribuição (Co + C = patamar); sendo: GD < 0,25 = Forte; 0,25 ≤ GD ≤ 0,75 = Moderada e GD > 0,75 = Fraca.

O Efeito Pepita ou Nugget effect (Co) representa a variância aleatória, ou seja, a variação não-dependente espacialmente sobre a escala avaliada; o patamar (Co + C) representa a distância na qual o atributo se encontra espacialmente dependente, representando o limite da dependência espacial; e, o alcance (a) estabelece a distância de correlação entre os pontos dentro de um mesmo raio, ou seja, estes pontos são mais homogêneos entre si.

Alguns fatores interferem na confiabilidade do variograma experimental, como a anisotropia que se ignorada a sua existência pode representar visões enganosas da verdadeira situação (Webster e Oliver, 2014).

2.6 Estimação linear – Krigagem

A krigagem constitui-se num método de estimação linear e local, para efetuar estimativas em locais não amostrados, que procura minimizar o erro de estimação. A teoria da krigagem é demonstrada a seguir, conforme a equação de Matheron (1969):

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad \text{Eq. 4}$$

em que, $\hat{z}(x_0)$ é a estimativa da KO no ponto (x_0) , $z(x_i)$ os valores vizinhos nos locais x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ e λ_i os pesos das observações associados aos valores vizinhos.

Dos diversos algoritmos de krigagem existentes como Krigagem simples, indicatriz, universal, em blocos, fatorial (Mendonça, 2013). A KO é o método de estimativa considerado o melhor no sentido de imparcialidade e variação

mínima, pois superam muitas das deficiências dos métodos matemáticos de interpolação. Ele leva em consideração a forma que uma propriedade varia no espaço por meio da função de variograma ou covariância (Oliver, 2010).

A interpolação por krigagem se diferencia de outros métodos de interpolação, devido fornecer estimativas não tendenciosas e de variância mínima associada ao valor estimado, também conhecido como BLUE (Best Linear Unbiased Estimator).

A Krigagem ordinária é uma média ponderada, em que a definição dos pesos é baseada em modelos de probabilidades, resolvida por conjuntos de equações lineares, denominados sistemas de krigagem (Webster e Oliver, 2014). Dessa forma, o modelo do variograma com função ponderada, acarreta na atribuição dos pesos, refletindo na correlação espacial dos dados (Sturaro, 2015).

2.7 Dimensão Fractal

O método da Dimensão Fractal (D_F) baseia-se na geometria fractal criada por Mandelbrot (1975) que define fractal como um objeto que pode ser dividido em partes, cada uma das quais semelhantes ao objeto original. Essa teoria busca padrões organizados de comportamento dentro de um sistema aparentemente aleatório. Uma característica associada aos fractais é a auto-similaridade exata, ou seja, a variação na escala gera sucessivas configurações idênticas a configuração inicial (Turcotte, 1986).

Contudo, existem fractais que igualmente formam cópias, mas estas são anisotrópicas, ou seja, com a variação na escala, as configurações formadas não seguem as mesmas proporções no tamanho em todas as direções, sendo variáveis em determinadas direções, neste caso estes fractais são denominados de auto-afins ou estatísticos (Mandelbrot, 1982)

Estruturas fractais são encontradas na natureza e possuem dimensões que não podem ser explicadas pela geometria Euclidiana e para reforçar esta idéia na descrição de Mandelbrot:

“Nuvens não são esferas, montanhas não são cones, continentes não são círculos, o som do latido não é contínuo e nem o raio viaja em linha reta”.

O conceito de fractais fornece meios de quantificar esses processos na natureza (Mandelbrot, 1977). A dimensão fractal é uma medida da fragilidade do material fragmentado (Turcotte, 1986).

A D_F é uma ferramenta eficientemente capaz de quantificar uma série de dados e descrever sua complexidade com maior precisão. Este método possibilita quantificar e integrar fenômenos biológicos, físicos e químicos do solo em diferentes escalas espaciais (Perfect e Kay, 1995), além de caracterizar as irregularidades no padrão espacial de propriedades do solo e detectar os fatores que condicionam a sua formação (Milos e Bensa, 2017; Zheng et al., 2019).

A estrutura espacial de superfícies fractais pode ser descrita pela seguinte relação de lei de potência (Vivas-Miranda, 2000):

$$|z(x) - z(x + h)| \propto h^H \quad \text{Eq. 5}$$

onde, z corresponde ao valor do atributo; x representa a localização espacial; h é referente a distância de separação e H é a codimensão fractal ou expoente de Hölder (Huang ; Bradford, 1992). Palmer (1988), define a codimensão fractal como:

$$H = d - D_F, \quad \text{Eq. 6}$$

em que, D_F é a dimensão fractal, e d é a dimensão Euclidiana do sistema.

Para um atributo distribuído no solo, sua dimensão fractal é representada como $D_F = 3 - H$ (Vivas-Miranda, 2000). Dessa forma, se $H=0$, $D_F = 3$, falta estrutura de variabilidade espacial, ou seja, há nenhuma relação entre a forma com que a propriedade varia no espaço em função de h , indicando ausência da dimensão fractal; neste caso, a metodologia não se aplica. Já quando $0 < H < 3$, a dimensão fractal assume valores que caracterizam a presença de estrutura de variabilidade espacial e dependência da propriedade com h (Palmer, 1988).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido a partir de um conjunto de dados legados do Grupo de pesquisa CSME referentes ao um experimento realizado em áreas de plantio comercial de cana-de-açúcar, que originaram trabalhos sobre a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo e de fatores de erosão. Assim, foi utilizado um banco de dados oriundos dos estudos de Sanches et al. (2009), Martins Filho et al. (2009) e Andrade et al. (2011).

Os estudos foram conduzidos no município de Tabapuã (SP), noroeste do estado de São Paulo, cujas coordenadas Geográficas são: 21°05'57" latitude Sul e 49°01'02" de Longitude Oeste, com 555 m acima do nível do mar (Figura 2).

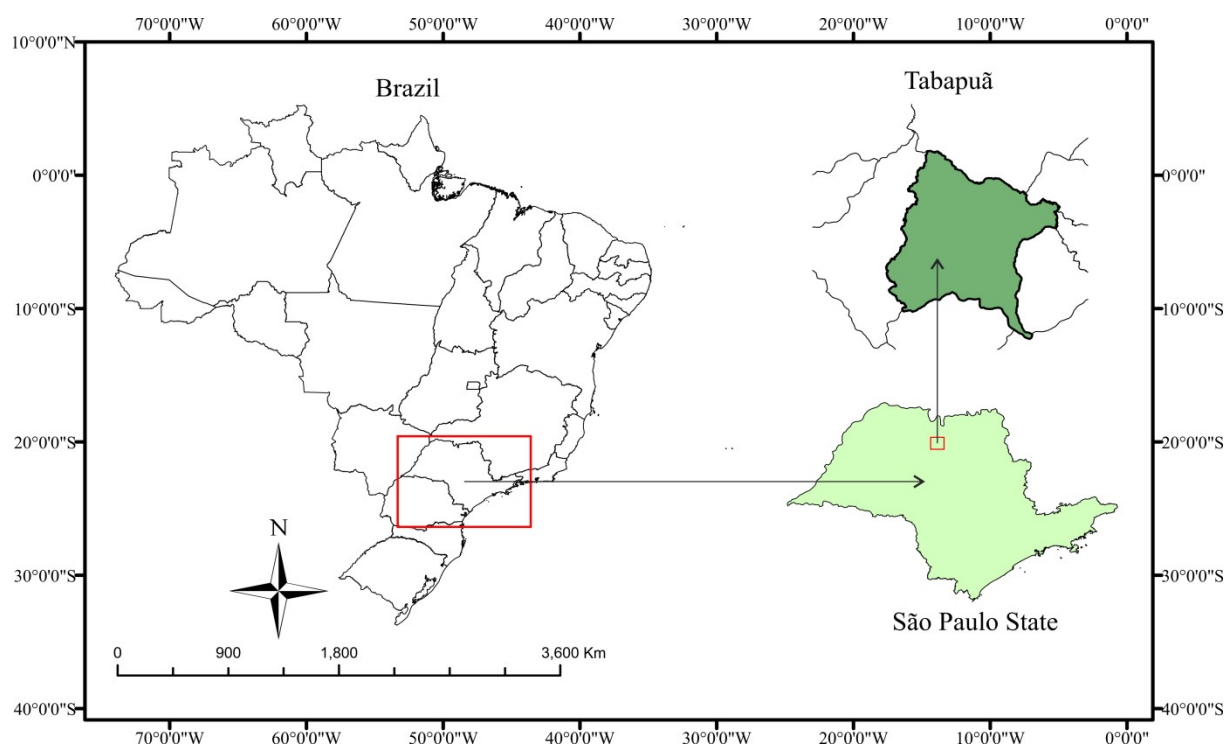


Figura 2 – Localização da área de cana-de-açúcar para a determinação de perda de solo e demais atributos do solo.

O histórico de cultivo da área é de uso intensivo com a cultura cana-de-açúcar por mais de 20 anos consecutivos. O clima da região, segundo a classificação de Thornthwaite, é do tipo megatérmico, C2dA'a', sub-úmido chuvoso com pouco ou sem excedente de água e evapotranspiração de verão menor que 48% do total anual (Thornthwaite, 1948 ; Rolim et al., 2007).

A região encontra-se na Província Geomórfica do planalto Ocidental Paulista, tendo como material de origem as rochas sedimentares do grupo Bauru formação Adamantina. De acordo com Santos et al. (2013), o solo foi classificado como Argissolo vermelho amarelo eutrófico, textura média argilosa.

As unidades Geomorfológicas foram classificadas conforme a estratigrafia e forma do terreno em duas pedoformas, côncava e convexa, de acordo com o modelo de Troeh, (1965), conforme a (Figura 3).

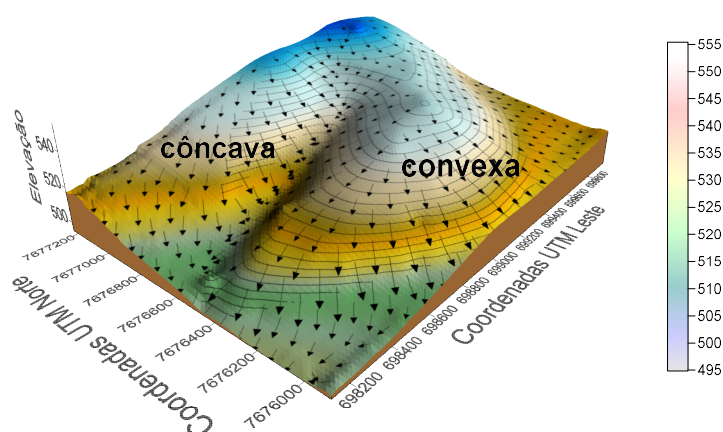


Figura 3 – Áreas côncava e convexa mostrando os vetores que representam o caminho superficial do fluxo de água.

A área côncava apresenta uma profunda ravina que deságua em uma nascente afluente do córrego que circunda a área e a área convexa se estende por uma encosta que se aprofunda até um vale.

A caracterização da variabilidade espacial nas diferentes direções foi realizada por meio de uma grade de 50×50 m com intervalos regulares de 0,50 m, sendo 270 na pedoforma côncava e 353 na pedoforma convexa, totalizando 623 pontos amostrais numa área de 200 ha.

A perda de solo foi estimada por Sanches et al. (2009), Martins Filho et al. (2009) de acordo com a Equação Universal de Perda de solo (USLE) (Wischmeier ; Smith, 1978) (Equação 1):

$$A = RKLSCP \quad \text{Eq. 7}$$

em que, A é perda de solo por erosão hídrica ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); R é o fator de erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$); K é fator de erodibilidade do solo ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); LS é o fator para o efeito combinado do declive e do comprimento

da rampa (adimensional); C é o fator cobertura e manejo do solo (adimensional); e P é o fator práticas conservacionistas (adimensional).

A variabilidade da perda de solo e dos atributos argila, AT, MO, CTC e P foi avaliada pela análise exploratória dos dados, calculando-se média, mediana, variância, coeficientes de variação, assimetria e curtose.

A dependência espacial da perda de solo, bem como dos atributos físicos e químicos do solo foi determinada por meio da análise do variograma experimental e sob as hipóteses intrínsecas e da estacionariedade (Webster; Oliver, 2014). A estimativa da semivariância, em uma dada distância de separação h , foi determinada pela fórmula:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad \text{Eq. 8}$$

em que N é o número de pares de pontos separados pela distância h , $Z(x_i)$ é o valor da variável Z no ponto x_i e $Z(x_i + h)$ é o valor da variável Z no ponto $x_i + h$. Utilizando-se as diferentes escalas de 50 m a 200m foram gerados mais de 80.000 variogramas experimentais por meio do Programa computacional R.

O grau de dependência espacial expresso em percentagem foi medido pela razão entre o efeito pepita e patamar $C_0/(C_0+C_1) \times 100 \%$ (Cambardella et al., 1994).

Extraiu-se a D_F em que selecionou-se, a escala mais representativa para a variabilidade espacial, utilizando o Programa Anisotrópic.

A estrutura espacial de superfícies fractais foi descrita pela seguinte relação de lei de potência (Vivas-Miranda, 2000):

$$|z(x) - z(x + h)| \propto h^H \quad \text{Eq. 9}$$

onde, z corresponde ao valor do atributo; x representa a localização espacial; h é referente a distância de separação e H é a codimensão fractal ou expoente de Hölder (Huang ; Bradford, 1992). De acordo com Palmer (1988), se $0 < H \leq 1$, a codimensão fractal é definida como:

$$H = d - D_F, \quad \text{Eq.10}$$

em que, D_F é a dimensão fractal, e d é a dimensão Euclidiana do sistema.

Assim, para um atributo distribuído no solo, sua dimensão fractal foi representada como $D_F = 3 - H$ (Vivas-Miranda, 2000). Então se compararmos as “equações 8 e 9”, pode-se dizer que os dados ao apresentarem um comportamento fractal em uma determinada escala, obtêm-se a seguinte proporção (Palmer, 1988):

$$\hat{y}(h) \propto h^{2H} \quad \text{Eq.11}$$

ou

$$\log[y(h)] \propto 2H \log[h] \quad \text{Eq.11a}$$

A partir da “equação 11a”, que na escala logarítmica é igual a $2H$, tem-se o expoente H obtido através da análise de regressão linear (Perfect e Kay, 1995).

$$H = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\log[\hat{y}(h)]}{2 \log(h)} \quad \text{Eq.12}$$

Se $H=0$, $D_F = 3$, falta estrutura de variabilidade espacial (efeito pepita) ou não há nenhuma relação entre a forma com que a propriedade varia no espaço em função de h , indicando ausência da dimensão fractal; neste caso, a metodologia não se aplica. Já quando $0 < H < 3$, a dimensão fractal assume valores que caracterizam a presença de estrutura de variabilidade espacial e dependência da propriedade com h (Palmer, 1988).

Dessa forma a D_F foi derivada a partir dos semivariogramas experimentais calculados em diferentes escalas e direções, sendo que a direção 0° representa a direção da declividade e 90° a direção do plantio.

Os parâmetros fator de anisotropia (F_a) e ângulo da direção de maior continuidade (α) foram calculados. Para $F_a = \alpha_2 / \alpha_1$, em que α_2 e α_1 são, respectivamente, os alcances nas direções de maior e menor continuidade espacial.

Para os ajustes dos modelos isotrópicos e anisotrópicos aos variogramas experimentais baseou-se na menor soma do quadrado do resíduo, maior coeficiente de determinação (R^2) e na validação cruzada (Isaaks ; Srivastava, 1989; Oliver; Webster, 2014) estimou-se os parâmetros para cada variável. Cada

valor de variância foi calculado com base nos 623 pontos. Como critério de seleção do modelo, utilizou-se a técnica de validação cruzada “cross-validation”, onde cada ponto foi removido individualmente e estimado por meio da contribuição dos seus vizinhos. Os valores de R^2 variam de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, o ajuste do variograma é mais eficiente.

Para a obtenção da krigagem ordinária, consideraram-se os modelos isotrópicos e anisotrópicos melhor ajustados aos variogramas experimentais. A estimativa da krigagem ordinária (KO) no ponto (x_0) não amostrado é dada pela equação:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i), \quad \text{Eq.13}$$

em que, $\hat{z}(x_0)$ é a estimativa da KO no ponto (x_0) , $z(x_i)$ os valores vizinhos nos locais x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ e λ_i os pesos das observações associados aos valores vizinhos. Estes são estimados com base no semivariograma ajustado. Os resultados obtidos com a krigagem envolvem o erro de estimação, que representa a diferença entre o valor observado e o valor que foi estimado, para um mesmo local.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatística descritiva da Perda de solo, atributos químicos e físicos do solo nas pedoformas côncava e convexa

A análise descritiva da perda de solo (A) e dos atributos do solo analisadas estão apresentadas no (Quadro 1). A variabilidade foi interpretada usando o coeficiente de variação (C.V.) de acordo com os critérios de classificação estabelecidos por (Warrick e Nielsen, 1980). Os resultados indicaram que os atributos A, MO e P apresentaram alta variabilidade nas duas pedoformas, que pode ser explicado pelo manejo do solo, pela palhada deixada no solo e as constantes adubações de fosfato (Martins Filho et al., 2009; Andrade et al., 2011; Sanches et al., 2012). A CTC apresentou variabilidade média na pedoforma côncava e alta na pedoforma convexa, que pode ser explicado pela maior aplicação da adubação nesta última (Sanches et al 2012).

Quadro 1 – Estatística descritiva da perda de solo, Atributos químicos e físicos do solo nas pedoformas côncava e convexa na profundidade de 0-0,20 m.

Variável	Pedof	Media	Median	Variância	EP	C.V.	Ass.	Curt.
	.		a					
A	Cônc	8.9	8.6	1.27E+17	2.16E+7	39.70	1.33	6.03
(t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Conv	10.2	9.6	1.48E+17	2.04E+7	37.93	0.95	1.31
Argila	Cônc	178.68	178.25	1495.82	2.35	21.64	-0.12	-0.65
(g kg ⁻¹)	Conv	183.42	191.00	1687.24	2.17	22.39	-0.48	-0.42
AT	Cônc	792.98	792.19	2112.50	2.79	5.79	-0.27	-0.72
(g kg ⁻¹)	Conv	788.85	786.42	1859.04	2.29	5.47	-0.15	-0.66
MO	Cônc	15.44	15.00	18.07	0.26	27.53	1.70	5.43
(g dm ⁻³)	Conv	15.96	15.00	16.78	0.22	25.67	1.77	5.36
CTC	Cônc	55.69	53.60	137.07	0.71	21.02	2.16	8.81
(mmol/dm	Conv	55.63	53.60	135.45	0.62	25.67	1.63	4.84
P	Cônc	36.12	14.00	3279.00	3.48	158.55	3.82	17.10
(mg dm ⁻³)	Conv	33.30	11.00	4782.90	3.66	207.70	6.56	61.73

A=Perda de solo; AT=Areia Total; MO=Matéria Orgânica; CTC=Capacidade de troca catiônica; P=Fósforo; Pedof.= Pedoforma; Conc= côncava; Conv.= convexa; EP=Erro Padrão da Média; C.V=Coeficiente de Variação; Ass=Assimetria; Curt=Curtose.

A argila apresentou variabilidade média em ambas às pedoformas que pode ser atribuída ao fato de ser um atributo intrínseco do solo, suas distribuições estão relacionadas ao material de origem, topografia, condução hidráulica e aos constituintes minerais e orgânicos do solo (Bortoluzzi et al., 2009). O atributo AT apresentou baixa variabilidade que esta associada à alta

estabilidade deste atributo no solo e pouca modificação ao longo do tempo (Sanches et al., 2009).

A perda de solo (A) apresentou valores médios de $10.2 \text{ ton/ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ na pedoforma convexa e $8.9 \text{ ton/ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ na côncava. Argissolos tem tolerância de perda de solo (T) de $6 \text{ ton/ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ (Corrêa et al., 2015). Logo os valores médios estão acima do valor de T , em ambas as pedoformas. No entanto na pedoforma convexa os valores médios de perda de solo são maiores que na côncava, indicando maior suscetibilidade aos processos erosivos.

Os atributos Argila e MO também apresentaram os maiores valores médios na pedoforma convexa que pode ser atribuído as práticas de manejo e variações topográficas, já que são atributos dinâmicos do solo. Já os atributos AT, CTC e P tiveram os valores médios maiores na pedoforma côncava que pode ser atribuído à convergência proporcionada pelo relevo que condiciona o comportamento de drenagem nesta pedoforma (Sanches et al., 2009).

A perda de solo (A), bem como os atributos MO, CTC e P apresentaram coeficientes de assimetria maiores que 1. Dessa forma para esses atributos foram realizadas transformações logarítmicas para os ajustes dos variogramas (Oliver; Webster, 2014).

4.2 Geoestatística da Perda de solo, atributos químicos e físicos do solo nas pedoformas côncava e convexa

Os resultados da análise geoestatística estão apresentados no (Quadro 2). Todas as variáveis apresentaram dependência espacial. Os variogramas experimentais estimados da perda de solo (A) e dos atributos argila, AT, MO, CTC e P ajustaram-se aos modelos esféricos e o exponencial, sendo o esférico, considerado o mais apto para descrever o comportamento de atributos do solo (Trangmar et al., 1985). Todos os atributos, bem como A, apresentaram dependência espacial moderada ou forte (Cambardella et al., 1994), indicando que o comportamento de A, bem como os atributos físicos e químicos analisados podem ser explicados pela dependência espacial.

Diferentes valores de alcance foram encontrados, sendo que a perda de solo (A), argila e AT apresentaram os menores alcances na pedoforma convexa

na condição anisotrópica, indicando maior variabilidade espacial destes atributos na pedoforma convexa.

A pedoforma côncava apresentou os menores valores de alcance para os atributos MO e P ambos na condição isotrópica, indicando maior variabilidade destes atributos na côncava. Somente o atributo CTC apresentou fator de anisotropia na pedoforma côncava, enquanto na pedoforma convexa todas as variáveis apresentaram fator de anisotropia indicando maior continuidade espacial na pedoforma convexa.

Quadro 2 – Modelos e parâmetros ajustados aos variogramas indicadores para os cenários estudados.

Variável	condição	Model	C_0	$Sill$	GDE	$\alpha(me)$	$\alpha(ma)$	Fa	SQR	R^2
Pedoforma Côncava										
Log de A	Iso	Exp.	0.016	0.135	0.45	269	---	---	1.183E-03	0.73
	Aniso	Esf.	0.092	0.32	0.29	3525	3525	1	0.0290	0.43
Argila	Iso	Exp.	840	2191	0.38	2922	---	---	42546	0.94
	Aniso	Exp.	738	2554.55	0.29	3615	3615	1	2263446	0.57
AT	Iso	Exp.	1104	2209	0.50	435	---	---	114702	0.86
	Aniso	Exp.	1053	5644.39	0.18	1577	1577	1	1,54E+07	0.57
Log de CTC	Iso	Exp.	0.004	0.034	0.12	123	---	---	9.044E-05	0.74
	Aniso	Exp.	0.031	0.089	0.33	10305	15597	0.66	3.374E-03	0.46
Log de MO	Iso	Exp.	0.008	0.058	0.13	132	---	---	4.780E-05	0.45
	Aniso	Exp.	0.046	0.131	0.35	7758	7758	1	3.126E-03	0.36
Log de P	Iso	Exp.	0.125	1.103	0.11	117	---	---	0.0220	0.75
	Aniso	Exp.	0.851	2.752	0.31	7953	7953	1	2.24	0.44
Pedoforma Convexa										
A	Iso	Esf.	6.09	14.62	0.31	410	---	---	1.32	0.98
	Aniso	Exp.	6	14.93	0.27	193.7	300.4	0.64	153	0.89
Argila	Iso	Esf.	655	1583	0.43	478	---	---	26178	0.97
	Aniso	Exp.	1031	1725.6	0.23	446.6	1090	0.41	1,0E-07	0.55
AT	Iso	Esf.	944	1889	0.48	440	---	---	46742	0.96
	Aniso	Esf.	1.6E-03	3.4E-03	0.46	333.2	464.30	0.72	1,3E-05	0.67
Log da CTC	Iso	Exp.	0.004	0.036	0.12	117	---	---	2.222E-05	0.74
	Aniso	Esf.	0.033	0.086	0.38	37590	54040	0.69	2.954E-05	0.40
Log da MO	Iso	Exp.	0.023	0.053	0.45	333	---	---	1.182E-04	0.76
	Aniso	Exp.	0.028	0.058	0.35	420.30	578.40	0.73	8.352E-03	0.53
Log do P	Iso	Exp.	0.573	1.287	0.44	291	---	---	0.0619	0.76
	Aniso	Exp.	1.099	3.118	0.35	12135	27522	0.44	3.98	0.35

C_0 =efeito pepita; C_0+C_1 =patamar; $C_0/(C+C_1)$ =grau de dependência espacial (%); ama =alcance maior(m); Ame =alcance menor (m); R^2 =coeficiente de determinação; SQR =soma do quadrado do resíduo; *Esf.*=modelo ajustado esférico; *Exp.*=modelo ajustado exponencial.

4.3 Dimensão Fractal (D_F) de perda de solo e demais atributos químicos e físicos do solo

Os variogramas foram ajustados nas escalas de 50 m a 200 m, estes geraram cerca de 80.000 variogramas experimentais e estão representados no

gráfico de contagem de D_F na (Figura 4). Dentre os variogramas calculados a escala de 100 m apresentou maior frequência de dependência espacial, indicando maior representatividade na contagem da D_F .

Sendo que a pedoforma convexa apresentou maior frequência de dimensão fractal significativa, indicando maior variabilidade espacial nesta pedoforma, que pode estar associado ao manejo e práticas de adubação (Sanches et al., 2012). Zhang et al., 2018 analisando a relação de fertilizantes e formação de agregados por meio da dimensão fractal, observaram alterações nos valores significativos de dimensão fractal do conteúdo de SOC, concluindo que os solos que receberam fertilizantes orgânicos formaram agregados maiores.

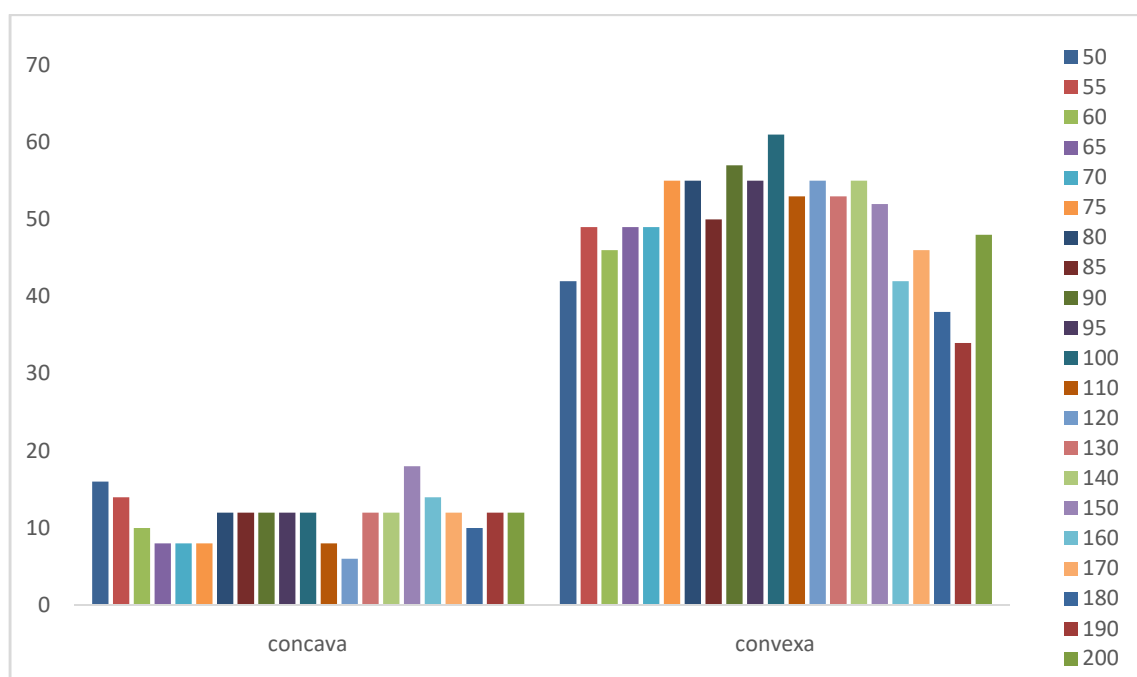


Figura 4 – Contagem de dimensão fractal significativa para perda de solo (A) em diferentes escalas e direções nas superfícies côncavas e convexas.

A análise da D_F na escala de 100 m está representada nas Figuras 5 e 6 nas pedoformas côncava e convexa respectivamente. Todos os atributos físicos e químicos, bem como a perda de solo apresentaram dependência espacial.

Analisando a perda de solo na pedoforma côncava os valores significativos de dimensão fractal variaram em (2.48 – 2.97) nas direções entre 90° e 150°, indicando estrutura de dependência espacial e comportamento isotrópico. No entanto foi possível observar condição anisotrópica nos atributos

MO e P nas direções de 45° (Figura 5) que está relacionada com área de maior altitude, que corroboram com resultados de Park et al (2018). Estes atributos apresentaram valores de D_F significativos (2.52 – 2.88) e (2.22 – 2.83) respectivamente.

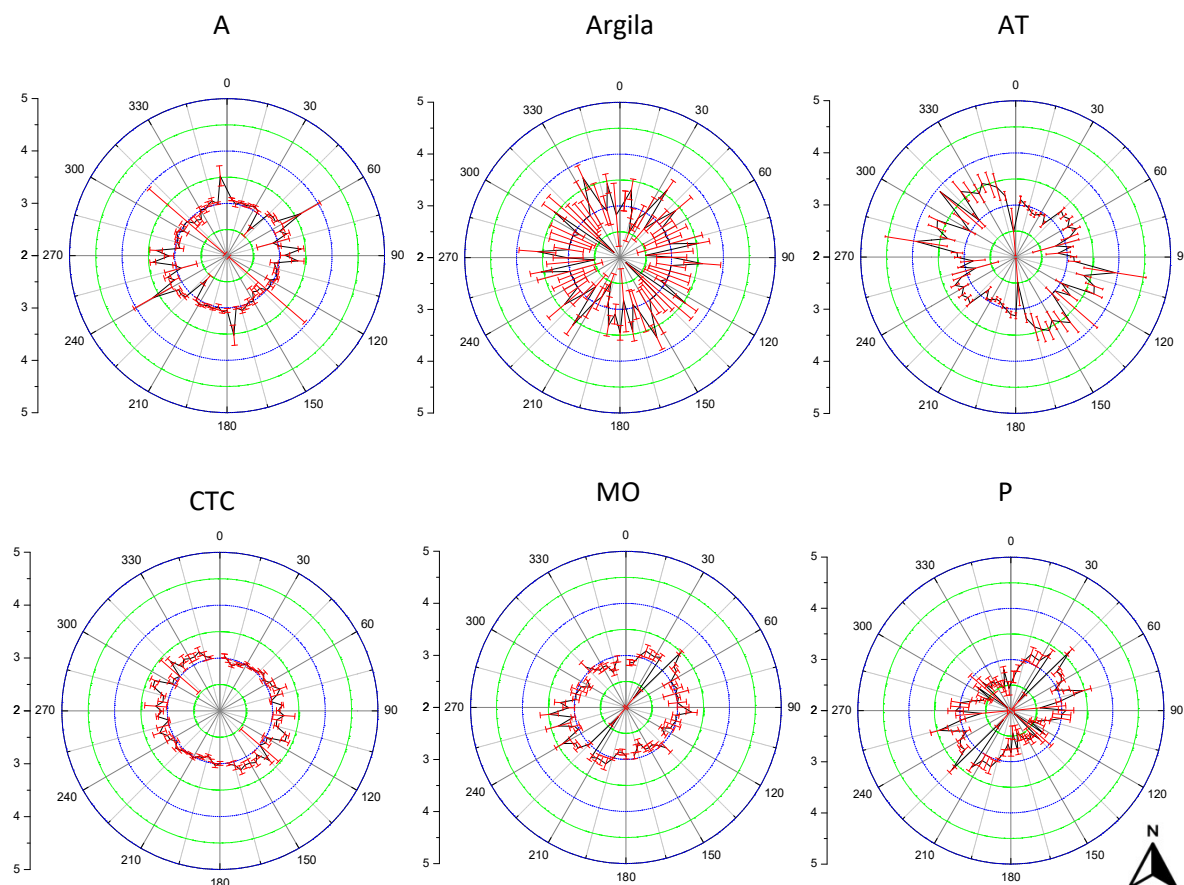


Figura 5 – Gráficos polares para dimensão Fractal (D_F) derivada dos variogramas experimentais de A, Argila, AT, CTC, MO e P na escala de 100 m na pedoforma côncava.

O atributo AT apresentou valores de D_F (2.60 – 2.90) e anisotropia nas direções 90° e 150°, que pode ser atribuído perpendicular a extensão de uma profunda ravina que se formou nesta pedoforma devido à convergência da inclinação que condiciona os fluxos de água.

Estes resultados corroboram com Sun et al. (2019) que analisando nutrientes e características fractais no solo em declives com e sem cobertura verificaram que as elevações e perdas de nutrientes ocorreram principalmente em declives.

Na pedoforma convexa observou-se valores de D_F para perda de solo superiores a 3 nas direções 90° e 120° no gráfico de rosas (Figura 6) que caracteriza uma anisotropia. Nessas direções a declividade foi classificada como moderadamente ondulada com inclinação entre 5° e 10° (Mendonça et al., 2017) e explica os fluxos de água que divergem nesta paisagem e promovem maior continuidade espacial e maiores perdas de solo e nutrientes. Nas demais direções os valores de D_F significativos variaram em (1.84 – 2.97), observando-se a presença de estrutura de variabilidade espacial.

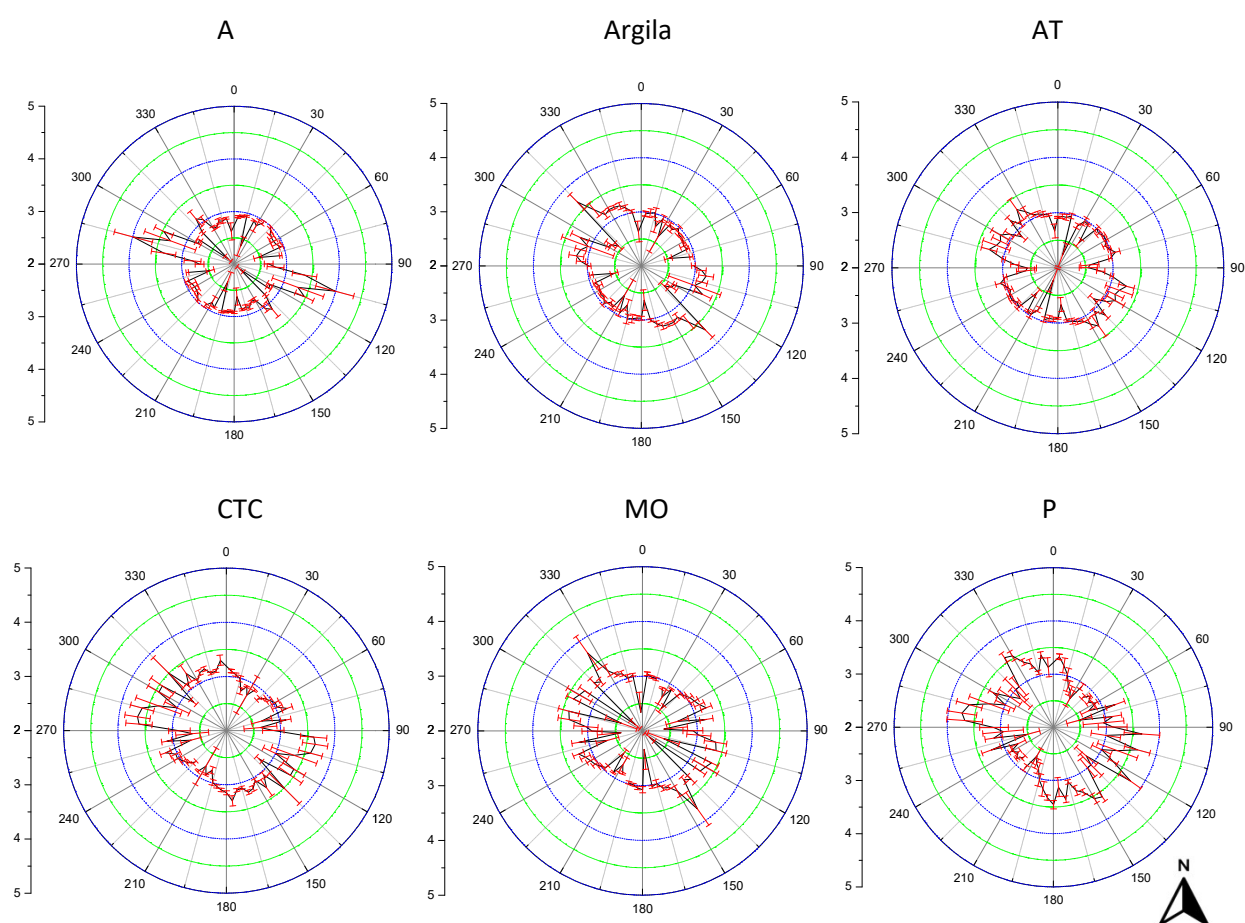


Figura 6 – Gráficos polares para dimensão Fractal (D_F) derivada dos variogramas experimentais da A, Argila, AT, CTC, MO e P na escala de 100 m na pedoforma convexa.

Os atributos argila e AT apresentaram respectivamente, valores de D_F significativa entre (0.64- 2.96 e 2.24- 2.96) e comportamentos similares com condição anisotrópica nas direções de 90° e 150° (Figura 6), que pode estar

relacionada com o intenso fluxo de máquinas e a variação de declividade nesta área.

Outra similaridade de comportamento foi observada nos atributos CTC, MO e P (Figura 6). Estes apresentaram valores de D_F maiores que 3 em várias direções, observados na direção 0°, 90° e 150° que pode estar associado as práticas de manejo no processo produtivo da cultura de cana-de-açúcar. A D_F significativa variou em (1.77- 2.91, 1.27- 2.93 e 1.92- 2.93) respectivamente, mostrando estrutura de variabilidade espacial.

Estudos ressaltam sobre os efeitos das práticas de preparo do solo e do gradiente de declividade na heterogeneidade do solo que são muito maiores do que os da chuva (Zhang et al., 2018) além da topografia e a direção do plantio (Vidal Vázquez, 2005).

A validação cruzada dos modelos isotrópicos e anisotrópicos nas respectivas pedoformas estão apresentados na Figura 7.

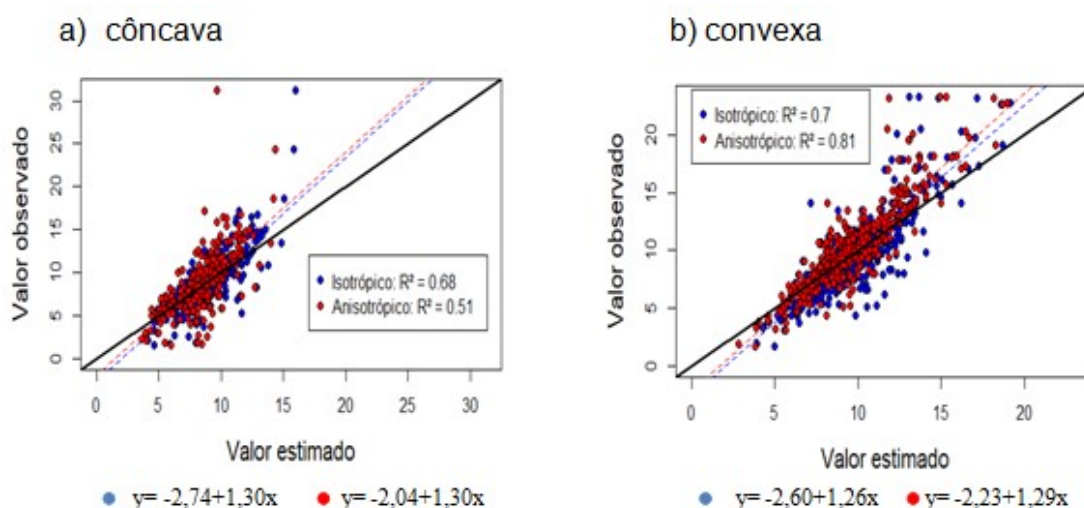


Figura 7 – Gráficos de dispersão da validação cruzada na área (a) côncava; (b) convexa.

Os resultados da validação cruzada apresentaram valores que reflete 68% e 81% de confiabilidade das estimativas realizadas respectivamente nas pedoformas côncava e convexa. Assim, para a representação do mapa de perda de solo utilizou-se o modelo isotrópico na pedoforma côncava e anisotrópico na pedoforma convexa.

O mapa representado na (Figura 8) mostra as perdas de solo na área total de cana de açúcar. Observam-se as maiores perdas de solo ($8\text{--}12\text{ t. ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$) em ambas as pedoformas, porém mais acentuadas na pedoforma convexa. Estes valores estão acima da Tolerância para argissolos, que são de $6\text{ t ha}^{-1}\text{ ano}^{-1}$ (Corrêa et al., 2015). Lima et al (2016) verificou que os argissolos vermelho amarelo eutrófico de textura média argilosa tem tolerância de perda de solo $T = 8.85$.

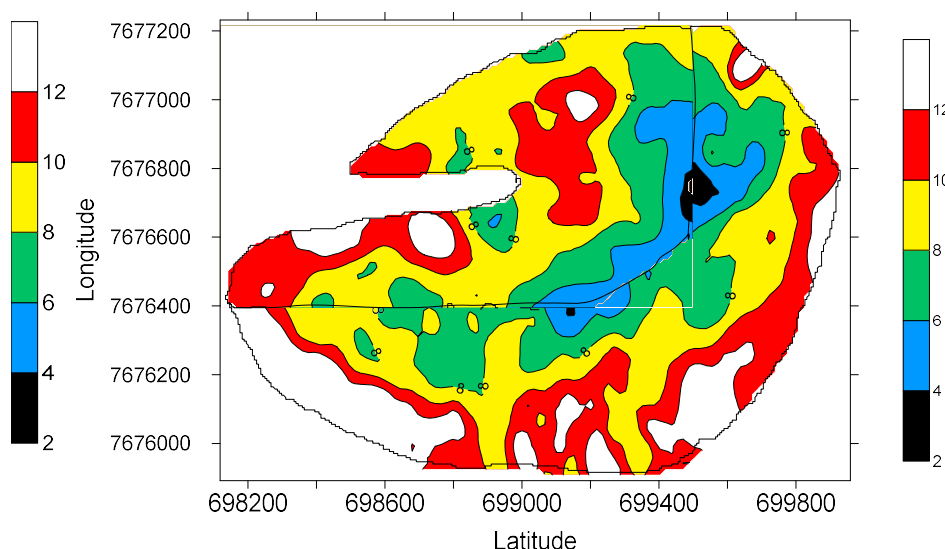


Figura 8 – Mapa de perda de solo da área total utilizando o modelo isotrópico na área côncava e o modelo anisotrópico na área convexa.

Assim, nas áreas onde a tolerância de perda de solo é maior que $8\text{ t. ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$ as práticas de intervenção aos processos de erosão devem ser mais intensivas, voltadas para a recuperação das áreas que já se encontram em estado de degradação.

Na área de transição entre as duas pedoformas, côncava e convexa encontram-se áreas com as menores perdas de solo. Nestas áreas devem ser realizadas práticas de conservação a fim de evitar os processos de erosão.

5 CONCLUSÕES

A anisotropia ocorreu com todas as variáveis na pedoforma convexa enquanto a pedoforma côncava apresentou comportamento isotrópico para perda de solo, argila e CTC, mostrando que o relevo condiciona a ocorrência de anisotropia.

A caracterização da anisotropia permitiu identificar as direções onde os processos ocorrem mais intensamente e a partir do mapa utilizando o modelo anisotrópico na pedoforma convexa e isotrópico na côncava, possibilitou a representação mais próxima da realidade do campo.

Os resultados mostraram que o relevo condiciona a ocorrência da anisotropia. E, para entender as causas de anisotropia do solo é preciso compreender os processos que operam em locais específicos e estão relacionados com os fluxos de água e com o relevo.

Nesse sentido o estudo da anisotropia em diferentes formas de relevo mostra-se eficiente na identificação e mapeamento, podendo servir de base para a gestão e execução de programas que visem à conservação do solo e da água.

6 REFERÊNCIAS

Andrade NSF, Martins Filho MV, Torres JLR, Pereira GT, Marques Júnior J(2001) Impacto técnico e econômico das perdas de solo e nutrientes por erosão no cultivo da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** 31:539-550. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000300014>

Almeida LS, Guimarães EC (2016) Geoestatística como ferramenta para o manejo sustentável da fertilidade do solo na cafeicultura. **Revista de Ciências Agrárias** 59: 370-377. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2453>

Barbosa AF, Oliveira EF, Miotto CL, Paranhos Filho EC. Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) em Softwares Livres e Gratuitos. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. 2015. Vol. 38 - 1. p. 170-179

Barbosa RS, Marques Júnior, J., Barrón, V. *et al.* (2019). Previsão e mapeamento de fatores de erodibilidade (USLE e WEPP) por suscetibilidade magnética em solos derivados de basalto no nordeste do estado de São Paulo, Brasil. **Environ Earth Sci** 78, 12. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8015-0>

Berveglieri A, Meneguette Junior M, Piteri MA. Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7222.

Borrelli P, Robinson DA, Fleischer LR., et al (2017) An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nat Commun**. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7

Borrelli P, Meusburger K, Ballabio C, Panagos P, Alewell C (2018) Object-oriented soil erosion modelling: A possible paradigm shift from potential to actual risk assessments in agricultural environments. **Land Degradation& Development** 29 .Doi: [HTTPS://doi.org/10.1002/ldr.2898](https://doi.org/10.1002/ldr.2898)

Bortoluzzi EC, Rheinheimer DS, Petry C, Caminsky J (2009) Contribuição de constituintes do solo à capacidade de troca de cátions obtida por meio de métodos diferentes. **Revista Brasileira de Ciência do solo** 33: 507-515. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000300004>.

Burt, TP e ST Trudgill (1985). Propriedades do solo, hidrologia de declive e padrões espaciais de desnudação química . **Geomorfologia e Solos** Pp. 13-16.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil. Science Society of America Journal**, 58: 1.501-1.511. Doi: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x

Campos MCC, Marques Jr J, Martins Filho MV, Souza ZM, Borges RCT (2013) Superfície geomórfica e estimativa da erosão do solo em um substrato arenito-

basalto de uma toposequência em Jardinópolis, São Paulo, Brasil. **Revista de Ciências Agrárias** 56: 227-234. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.033>

Companhia Nacional de Abastecimento- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. V.6 Safra 2019-2020- n.3 Terceiro Levantamento. Brasília: 2019 p. 1-58, dezembro de 2019. [acesso em 26 Dez 2019]. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

Corrêa EA, Moraes IC, Pinto SAF (2015) Estimativa da erodibilidade e tolerância de perdas em solos oriundos de arenitos e argilitos da região centro leste paulista. **Geociências** 34: 848-860.

Corrêa EA, Moraes IC, Pinto SAF, Lupinacci CM (2016) Perdas de solo, Razão de Perdas de Solo e Fator Cobertura e Manejo Da cultura de cana-de-açúcar: Primeira. **Revista do Departamento de Geografia** 32: 72-87.
DOI: 10.11606/rdg.v2i0.116671

Clubb FJ, Mudd SM, Attal M, Milodowski DT, Grieve SWD (2016) The relationship between drainage density, erosion rate, and hilltop curvature: Implications for sediment transport processes. **J. Geophys** 121: 1724–1745
Doi:10.1002/2015JF003747.

Dechen SCF, Telles TS, Guimarães MF, Maria IC (2015). Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia** 74. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0363>

FAO, 2019. Outcome document of the Global Symposium on Soil Erosion. Rome

FAO and ITPS, 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy

Gamma Design Software. GS+ (2008) Geostatistics for the Enviromental Sciences version 9. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan, USA.

Guedes PCL, Uribe-Opazo MA, Johann JA, Godoy de Souza E (2008) Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32, núm. 6: 2217-2226. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600001>

Huang C, Bradford JM (1992) Application of a laser scanner to quantify soil microtopography. **Soil Science Society of America Journal** 56:14-21. h
jDoi:10.2136/sssaj2003.0092

Isaaks EH, Srivastava RM. A introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, 1989. 592 p.

Keshavarzi AA, Tuffour HO, Bagherzadeh A, Vasu D (2018) Spatial and fractal characterization of soil properties across soil depth in an agricultural field, Northeast Iran. **Eurasian J SoilSci**, 7: 93 – 102. Doi: 10.18393/ejss.339032

Lanzanova ME, Eltz FLF, Nicoloso RS, Cassol EA, Bertol I, Amado TJC, Girardello VC (2013). Efeito residual do preparo do solo sobre a erosão hídrica em um Argissolo Vermelho sob plantio direto e sistemas de culturas de longa duração. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** 37 no.6. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000600025>

Liao K, Lai X, Zhou Z, Zhu Q (2017) Applying fractal analysis to detect spatio-temporal variability of soil moisture content on two contrasting land use hillslopes. **Catena** 157: 163-172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.022>

Lima CGR, Carvalho MP, Souza A, Costa NR e Montanari R (2016). Influência de atributos químicos na erodibilidade e tolerância de perda de solo na bacia hidrográfica do baixo São José dos Dourados. **Geociências** 35: 63-76.

Martins Filho MV, Liccioti TT, Pereira GT, Marques Júnior J, Sanchez RB (2009) Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, 29:8-18. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000100002>

Mandelbrot BB (1975) The Fractal Geometry of Nature (W.H. Freeman and Company, Nova Iorque)

Mandelbrot, BB. (1977) Fractals: Form, Chance and Dimension. Freeman, London

Matheron G. Principles of geoestatistics Econ. Geol.1963. 58,1246-1266.

Matheron G (1965) Les variables régionalisées et leur estimation. Masson, Paris.

Matheron G (1969) Le krigeage Universel Cahiers Du centre de Morphologie Mathématique, n 1. Ecole de Mines, Fontainebleau.

Meireles HT, Marques Júnior J, Campos MCC, Pereira GT (2012) Relações solo-paisagem em topossequência de origem basáltica. **Pesq. Agropec. Trop.** 42, n. 2, 129-136. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-40632012000200001>

Mendonça PG (2013) **Incerteza espacial da perda de solo e nutrientes por erosão em um argissolo em cenários de cultivo de cana-de-açúcar**. 88f. Tese (Doutorado em Agronomia) Unesp, Jaboticabal.

Mendonça PG, Silva Júnior JF, Oliveira IR, Teixeira DB, Moitinho MR, Martins Filho MV, Marques Júnior J, Pereira GTR (2015) Spatial Uncertainty of nutrient loss by erosion in Sugarcane Harvesting

Scenarios. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1181-1189. Doi: 10.1590/01000683rbcS20140432

Mendonça PG, Teixeira DB, Moitinho MR, Silva Júnior JF, Martins Filho MV, Marques Júnior J, Pereira GT (2017) Temporal and spatial uncertainty in typhoid soil loss from the argisol under sugarcane management scenarios. **Rev. Bras. de Ciência do Solo** 42:170-182. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20170182>

Milos B, Bensa A (2017) Fractal approach in characterization of spatial pattern of soil properties. **Eurasian Journal of Soil Science** 6(1): 20-27.

Oliveira RP, Grego CR, Brandão CN (2015) Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o vespene. Embrapa Brasília, DF.

Oliver MA. (Ed.) 2010. Geostatistical Applications in Precision Agriculture. Springer, Dordrecht.

ONU News / Perspectiva Global, Reportagens Humanas (2019). Disponível em: <https://news.un.org>.

Palmer MW (1988) Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. **Vegetatio** 75: 91-102. <https://doi.org/10.1007/BF00044631>

Palmer RC e Smith RP (2013) Soil structural degradation in SW England and its impact on surface-water runoff generation. **Soil Use and Management** <https://doi.org/10.1111/sum.12068>

PanagosP, Borrelli P and Meusburger K (2015) A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. **Geosciences**. 5: 117-126. Doi:10.3390/geosciences5020117

PanagosP, Borrelli P and Meusburger K, Zanden EH, Poesen J, Alewell C (2015) Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. **Environmental Science & Policy** 51. 23-34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012>

Park JS, Ahn IY, Lee EJ (2018) Spatial Distribution Patterns of the Antarctic Hair Grass *Deschampsia antarctica* in Relation to Environmental Variables on Barton Peninsula, King George Island. **Arctic, Antarctic, and Alpine Research** <https://doi.org/10.1657/1938-4246-45.4.563>

Perfect e Kay BD (1995) Applications of fractals in soil and tillage research: a review. **Soil & Tillage Research** 36: 1-20. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)81397-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)81397-3)

Resende JMA, Marques Júnior J, Martins Filho MV, Dantas JS, Siqueira DS, Teixeira DDB (2014). Variabilidade Espacial de atributos de solos coesos do Leste Maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** vol.38 no.4, Viçosa July/Aug. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400004>.

Rolim GS, Camargo MBP, Lania DG, Moraes JFL (2007) Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia** 66 (4) 711-720. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022>

Sanchez RB, Marques Júnior J, Souza ZM, Pereira GT, Martins Filho MV (2009) Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia** 68:1.095-1.103. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052009000400030>

Sanchez RB, Marques Júnior J, Pereira GT, Martins Filho MV, Neto JB, Siqueira DS, Souza ZM (2012) Mapeamento das formas do relevo para estimativa de custos de fertilização em cana-de-açúcar. **Eng. Agríc.** 32: (2); 280-292. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000200008>

Santos HL, Marques Júnior J, Matias SSR, Siqueira DS, Martins Filho MV (2013) Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. **Eng. Agríc.** 33:64-74.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Oliveira J. B, Coelho MR, Lumbreras JF, Cunha TJF (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solo 353 p.

Siqueira DS, Marques Júnior J, Pereira GT (2010) The use of landforms to predict the variability of soil and Orange attributes. **Geoderma** V.155, n.1-2, p. 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.024>

Sousa GB, Martins Filho MV, Matias SSR (2012) Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba – SP. **Eng. Agríc.** V.32 no.3 <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000300008>

Sturaro JR (2015). Apostila de geoestatística aplicada. Depart. de Geologia aplicada-IGCE. Unesp, Rio Claro.

Sun W, Shao Q, Liu J, Zhai J (2014) Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. **Catena** Vol. 121, 151-163. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.009>

Thornthwaite CW (1948) An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review** 38:55-94.

Trangmar BB, Yost RS, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties (1985) **Adv. Agron** 38:45-93. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2)

Telles TS, Guimarães MF, Dechen SCF. The costs of soil erosion (2011) **Revista Brasileira de Ciência do Solo** Vol. 35: 287-298. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200001>

Troeh FR (1965). Landform equations fitted to contour maps. American Journal of Science Vol. 263, p.616-627. doi:10.2475/ajs.263.7.616

Turcotte, D. L. (1986) Fractals and fragmentation. J. Geo Res Solid Earth 91(B2), 1921–1926 .

VanzelaLS, Hernandez FBT, Franco RAM (2010) Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental** 14: (1); 55–64. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000100008>

Vidal Vázquez E, Vivas Miranda JG, Paz González A (2005) Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. **Ecological Modelling** 182: 337–353. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2004.04.012

Vivas-Miranda J (2000) Análisis fractal del microrrelieve Del suelo [tese]. Coruña: Universidad de la Coruña.

Warrick AW, Nielsen DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic 319-344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>

Webster R, Oliver MAA (2014) Tutorial guide to Geostatistics: computing and modeling variograms and kriging. **Catena** 113:56-69. DOI: 10.1016/j.catena.2013.09.006

Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. Washington, Department of Agriculture 58p. Agriculture Handbook, number 537.

Zhang Q, Wang J, Wu F (2018) Spatial Heterogeneity of Surface Roughness on Tilled Loess Slopes in Erosion Stages. **Soil & Water Res.** 13 (2): 90–97 <https://doi.org/10.17221/130/2017-SWR>.

Zhang, Jiaoyang & Sun, Caili & Liu, Guobin & Xue, Sha. (2018) Effects of long-term fertilisation on aggregates and dynamics of soil organic carbon in a semi-arid agro-ecosystem in China. **Peer J.** 6. e4758. 10.7717/peerj.4758.

Zheng X, LI L, Chen S, Jiang T, Zhao K (2019) Temporal evolution characteristics and prediction methods of spatial correlation function shape of rough soil surfaces. **Soil & Tillage Research.**
<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104417>

