

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS JABOTICABAL**

**VARIABILIDADE ESPAÇOTEMPORAL DA FERTILIDADE DO
SOLO EM NDVI EM ÁREA DE CERRADO BRASILEIRO**

**Ludhanna Marinho Veras
Mestre em Ciência do Solo**

2023

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA -UNESP
CÂMPUS JABOTICABAL**

**VARIABILIDADE ESPAÇOTEMPORAL DA FERTILIDADE DO
SOLO EM NDVI EM ÁREA DE CERRADO BRASILEIRO**

Discente: Ludhanna Marinho Veras

**Orientador: Prof. Dr. Alan Rodrigo
Panosso**

**Coorientadora: Prof. Dr. Teresa Cristina
Pissara Tarlé**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção de título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo).

V476v Veras, Ludhanna Marinho
Variabilidade espaço temporal da fertilidade do solo em ndvi
em área de cerrado brasileiro / Ludhanna Marinho Veras. --
Jaboticabal, 2023
83 p. : tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal

Orientadora: Alan Rodrigo Panosso
Coorientadora: Teresa Cristina Pissara Tarlé

1. Anisotropia. 2. Dimensão fractal. 3. NDVI. 4. Agricultura
sustentável. 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

REGISTRO DE IMPACTO

O trabalho analisa as variações espaciais e temporais da fertilidade do solo para o desenvolvimento da agricultura tropical com práticas sustentáveis. Os resultados trazem pontos de mudanças significativas na produção agrícola, abordando questões importantes para o desenvolvimento de estratégias no manejo de áreas produtivas, compreendendo práticas que venham contribuir com uma agricultura sustentável, produção responsável, preservação de recursos naturais e consequentemente combate a mudança climática e seus impactos.

IMPACT RECORD

The work analyzes the spatial and temporal variations of soil fertility for the development of tropical agriculture with sustainable practices. The results bring significant shifts in agricultural production addressing important issues for developing strategies in managing productive areas, understanding practices that contribute to sustainable agriculture, responsible production, preservation of natural resources, and thereby combat climate change and its impacts.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: VARIABILIDADE ESPAÇOTEMPORAL DA FERTILIDADE DO SOLO EM NDVI EM
ÁREA DE CERRADO BRASILEIRO

AUTORA: LUDHANNA MARINHO VERAS

ORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

COORDINADORA: TERESA CRISTINA TARLÉ PISSARRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. DIEGO SILVA SIQUEIRA (Participação Virtual)
SolloAgro - ESALQ/ USP / Piracicaba/SP

Documento assinado digitalmente
DIEGO SILVA SIQUEIRA
Data: 19/05/2023 13:23:40-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO (Participação Virtual)
UFSCAR / Araras/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO
Data: 18/05/2023 10:15:50-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jaboticabal, 17 de maio de 2023

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

LUDHANNA MARINHO VERAS – nascida em 22 de setembro de 1989, na cidade de Itaituba – PA. Filha de Antônio José Soares Veras e Laurenice Penha Marinho. Ingressou no Curso de Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Chapadinha-MA, em agosto do ano de 2011. Foi bolsista de iniciação científica da FAPEMA pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA), onde foi colaboradora do projeto “Otimização da Produção de Etanol no Estado do Maranhão com Preservação da Qualidade da Água e do Ar” e “Seleção de genótipos de girassol para produção de biodiesel no estado do Maranhão com preservação da qualidade ambiental”. Em agosto de 2017 iniciou o Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal-SP, sendo bolsista CAPES. Sendo aprovada no Curso de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) em março de 2019. Em 2022 foi aprovada para atuar como Agente de Inovação Local - Rural, pelo Sebrae, onde trabalha com o fomento ao sucesso de negócios rurais por meio da educação empreendedora e dos ecossistemas de inovação. Em maio de 2023, obteve o título de doutora em Agronomia com ênfase em Ciência do Solo.

“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar a aonde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.”

Bill Gates

DEDICO

À Deus,
À minha família.

OFEREÇO

Aos meus amigos

AGRADECIMENTO

À Deus, por ter me concedido tantas bênçãos e por iluminar minha vida diariamente.

À minha mãe, meu exemplo de força, dedicação e amor. Meu apoio de sempre, sem o qual eu jamais conseguiria conquistar tudo o que conquistei e que nunca mediu esforços para que eu concretizasse todos os meus sonhos

Ao meu pai Antônio (*in memorian*), pelo apoio e sacrifícios que fez por mim em vida. Amo você mais do que consigo expressar.

Ao meu irmão Antonyere, por ser o meu maior incentivador e mesmo distante sempre foi meu maior defensor.

Ao meu padrasto, com quem não divido o mesmo sangue, mas que ama minha família incondicionalmente.

À minha grande, unida e ouriçada família, que sempre entende minhas faltas em datas comemorativas, mas que sempre me acolhe quando preciso.

Ao meu trio Rayanne Rocha, Leticiane Pereira e Isadora Moraes, irmãs de vida com quem compartilhei as melhores histórias ao longo da minha juventude.

Ao Professor Alan Rodrigo Panosso, meu orientador. Agradeço pela paciência, pelo apoio e por todos os ensinamentos ao longo desses 6 anos. O senhor é um ser humano incrível!

À Pesquisadora Dra. Teresa Cristina, por me aceitar como coorientada e me apoiar na continuação da pesquisa e na redação científica. A senhora é enorme!

Aos professores Gener Tadeu e Marcilio por terem contribuído para a melhoria da Tese como banca examinadora no exame Geral de qualificação.

As companheiras de casa que dividiram o mesmo teto comigo quando cheguei em Jaboticabal, Bruna e Wellyne.

Ao Gustavo André, amigo e irmão de outros caminhos com que dividi histórias, jornadas, emoções e aventuras.

À Camila, Deise Cristina, Kamilla, Kleve, Maria Elisa, Paulo e Katharine pela amizade, pelos ouvidos emprestados nas horas de desespero.

As amigas e funcionárias do departamento de Ciências Exatas, Zezé, Adriana e Shirley pelo carinho, zelo e disponibilidade em sempre nos atender.

Ao Fabrício Galatti, meu amigo e companheiro, com quem tenho dividido as alegrias da vida. Obrigada pelo carinho, cuidado, apoio, parceria e paciência.

Aos amigos do Proagros, onde iniciei os caminhos da pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa em Política de Uso do Solo (PolUS).

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, SP.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todas as pessoas que contribuíram para a realização desse trabalho de maneira direta ou indireta, muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
RESUMO	i
ABSTRACT:.....	iii
CAPÍTULO 1 - Considerações Gerais.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Revisão De Literatura	3
1.2.1 A importância da cana-de-açúcar no cenário mundial e brasileiro	3
1.2.2 Variabilidade dos atributos físicos e químicos do solo	5
1.2.3 O Uso de Sensoriamento Remoto na Agricultura	6
1.2.4 Teorias e Aplicações da Análise Fractal	9
1.3 Referências	12
CAPITULO 2 - DINÂMICA TEMPORAL DA FERTILIDADE DO SOLO NA ÁREA DE CANA DE AÇÚCAR COM ÊNFASE NA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL.....	24
2.1 Introdução.....	26
2.2 Materiais e Métodos.....	28
2.2.1 Instalação e Condução do Experimento.....	29
2.2.3 Determinação dos atributos do Solo	29
2.2.4 Análise Fractal dos Resultados.....	30
2.3 Resultados e Discussão.....	31
2.3.1 Variabilidade Espaço-temporal dos atributos estudados.....	31
2.4 Conclusão.....	39
2.5 Referências.....	39
CAPÍTULO 3 – DIMENSÃO FRACTAL DA REFLECTÂNCIA DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL.....	47

3.1 Introdução	48
3.2 Material e Métodos	50
3.2.1 Caracterização da área de estudo	50
3.2.1 Instalação do Experimento.....	50
3.2.2 Coleta e amostragem do NDVI na área estudada.....	51
3.2.3 Análises estatísticas e Fractal dos dados coletados	51
3.3 Resultados e Discussão.....	52
3.3.1 Variabilidade Espaço-temporal dos atributos estudados.....	54
3.4 Conclusão	58
3.5 Referências.....	58
CAPÍTULO 4 - Considerações Finais.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais países produtores de cana-de-açúcar do mundo.....	2
Figura 2. Níveis da Curva de Koch.....	10
Figure 3. Geographical location of the study area.....	27
Figura 4. Fractal dimension (DF) in different directions of the soil attributes under sugarcane cultivation. (CEC, Ca, K, Mg)	34
Figura 5. Fractal dimension (DF) in different directions of the soil attributes under sugarcane cultivation. (CEC, OM, pH)	35
Figura 6. Precipitação e temperatura da área de estudo ao longo dos cortes realizados.....	51
Figura 7. Gráfico de rosas do NDVI ao longo dos cortes observados, na direção de 0° a 330°.....	53

LISTA DE TABELAS

Table 1. Table of classification standards of soil <i>Cation exchange</i> capacity (CEC)..	30
Table 2. Descriptive statistics of variables in the sugarcane cultivation area	31
Tabela 3. Estatística descritiva do NDVI ao longo dos cortes observados.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

° – Grau

°C – Grau Celsius

AP - Agricultura de Precisão

Ca - Cálcio

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CTC - Capacidade de Troca Catiônica

CV - Coeficiente de Variação)

D_F - Dimensão Fractal

EOS - Earth Observing System

ESE - Earth Science Enterprises

FAO - Food and Agriculture Organization

GEE - gases de efeito estufa

K - Potássio

KCl - Cloreto de potássio

MAP - Fosfato monoamônico

Mg - Magnésio

MO - Matéria Orgânica

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MODIS / AQUA - Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, a bordo do satélite Aqua (EOS PM-1)

MODIS / TERRA – Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, a bordo do satélite Terra (EOS AM-1)

Mt – megatonelada

NASA / POWER – NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources

NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

NIR - faixa do infravermelho próximo

ONU - Organização das Nações Unidas

pH - potencial hidrogeniônico

RED - faixa do vermelho

UNFPA – United Nations Population Fund

VARIABILIDADE DA FERTILIDADE DO SOLO E NDVI EM ÁREA DE CERRADO BRASILEIRO

RESUMO: A demanda por alimentos é crescente. Até 2050 teremos que produzir alimentos para 9 bilhões de pessoas. Portanto, os sistemas de produção devem possuir alto rendimento e qualidade. O Brasil é um exportador de commodities que se mostra fundamental para suprir essa demanda futura. Elevar a produtividade das áreas de lavouras com meios mais eficientes de monitoramento é um dos desafios. O estudo objetiva o uso de ferramentas da agricultura de precisão para conhecer variabilidade da área de estudo, com a finalidade de uma agricultura sustentável com maior assertividade, maiores produtividade e redução de custos, por meio da geoestatística e do sensoriamento remoto. Estudar a diferença de escala e variações em áreas de produção ajuda na compreensão da dinâmica da vegetação e sua interação com outros componentes. A variabilidade dos atributos K e o pH do solo ($D_F < 3$) foi encontrada ao longo do desenvolvimento da cultura. Já o Mg (Magnésio) e a MO (Matéria Orgânica) apresentaram valores de D_F (Dimensão Fractal) igual 3 ou maior 3 ao longo dos cortes realizados. O estudo mostra que o solo do Cerrado é heterogêneo e que a calagem para a correção da acidez do solo e as adubações devem considerar a variabilidade do solo. Em relação ao NDVI o 1º corte, se mostrou padronizado com a presença anisotrópica no ângulo de 120° e 300° ($D_F = 3$ ou $D_F > 3$). O NDVI apresentou dependência espacial no ângulo de 60°, 150° e 330° ($D_F < 3$). A anisotropia ($D_F = 3$ ou $D_F > 3$) ocorreu no mesmo ângulo do 1º corte (120° e 300°), padrão que se repetiu no 3º corte. Os valores do mínimo e máximo (0.292 - 0.675) do NDVI demonstraram que a radiação que é refletida pela superfície da cana-de-açúcar varia ao longo do tempo. Os valores de média 0.607, 0.546 e 0.586, no 1º, 2º e 3º corte, respectivamente, mostrou o vigor da cana-de-açúcar nos cortes iniciais apresentado uma tendência a queda a partir do 4º corte. O NDVI apresentou $D_F = 3$ ou $D_F > 3$ no 1º, 2º e 3º corte, nos mesmos ângulos estudados o de 120° e 300°. Ao longo dos cortes ocorreu o efeito de anisotropia de refletância de superfície no NDVI, o que indica a influência de declividade e da linha de plantio na refletância cana-de-açúcar. A dimensão fractal se mostrou uma ferramenta importante para a

caracterização da anisotropia, se mostrando sensível a elementos externos como o relevo, chuva, ações antrópicas e cobertura vegetal.

Palavras chaves: Anisotropia; Dimensão Fractal; Atributos do Solo; Reflectância; Agricultura Sustentável.

SOIL FERTILITY VARIABILITY AND NDVI IN BRAZILIAN CERRADO AREA

ABSTRACT: The demand for food is growing. By 2050 we will have to produce food for 9 billion people. Therefore, production systems must have high yields and quality. Brazil is a commodity exporter that proves to be fundamental to supplying this future demand. Increasing the productivity of crop areas with more efficient means of monitoring is one of the challenges. The objective of the study is to use precision agriculture tools to know the variability of the study area, with the aim of sustainable agriculture with greater assertiveness, higher productivity, and cost reduction, through geostatistics and remote sensing tools. Studying the difference in scale and variations in production areas helps in understanding the dynamics of vegetation and its interaction with other components. The variability of K attributes and soil pH ($DF < 3$) was observed throughout the crop development. On the other hand, Mg (Magnesium) and OM (Organic Matter) presented values of DF (Fractal Dimension) equal to 3 or greater than 3 along the cuts performed. The study shows that Cerrado soil is heterogeneous and that liming to correct soil acidity and fertilization must consider soil variability. The NDVI in the 1st cut was standardized with an anisotropic presence at angles of 120° and 300° ($DF = 3$ or $DF > 3$). In the 2nd cut, we have the presence of variability structure. The NDVI showed spatial dependence at angles of 60°, 150°, and 330° ($DF < 3$). The anisotropy ($DF = 3$ or $DF > 3$) occurred at the same angle as the 1st cut (120° and 300°), a pattern that was repeated in the 3rd cut. The minimum and maximum values (0.292 - 0.675) of the NDVI indicated that the radiation that is reflected by the sugarcane surface varies over time. The mean values of 0.607, 0.546, and 0.586, in the 1st, 2nd, and 3rd cut respectively, showed the vigor of the sugarcane in the initial cuts, showing a downward trend from the 4th cut. The NDVI presented $DF = 3$ or $DF > 3$ in the 1st, 2nd, and 3rd cut at the same studied angles, 120° and 300°. The effect of anisotropy of surface reflectance in the NDVI occurred along the cuts, which indicates the influence of slope and planting row on sugarcane reflectance. The fractal dimension proved to be an important tool for the characterization of anisotropy, being sensitive to external elements such as relief, rain, anthropic actions, and vegetation cover.

Keywords: Anisotropy; Fractal Dimension; Soil Attributes; Reflectance; Sustainable Agriculture.

CAPÍTULO 1 - Considerações Gerais

1.1 Introdução

A demanda por alimentos tem aumentado rapidamente. Uma das justificativas é o crescimento significativo da população ano após ano. De acordo com a UNFPA e a ONU a população mundial deve atingir 9 bilhões de pessoas até 2050, o que vem a ocasionar um aumento de até 70% na demanda por alimentos. Para alimentar bilhões de pessoas, os sistemas de produção devem possuir alto rendimento e qualidade, o que é um desafio. Além disso, as questões energéticas têm atraído grande atenção devido à estreita relação com o desenvolvimento econômico, a estabilidade social e a proteção ambiental, especialmente em países em desenvolvimento (Mohlin et al. 2018), o que despertou nas últimas décadas a busca por fontes de energia renovável e tem incentivado o desenvolvimento de uma nova matriz energética capaz de atender à crescente demanda de energia global, por meio de uma produção sustentável e, ao mesmo tempo, evitar a competição com a produção de alimentos (Carvalho-Netto et al., 2014).

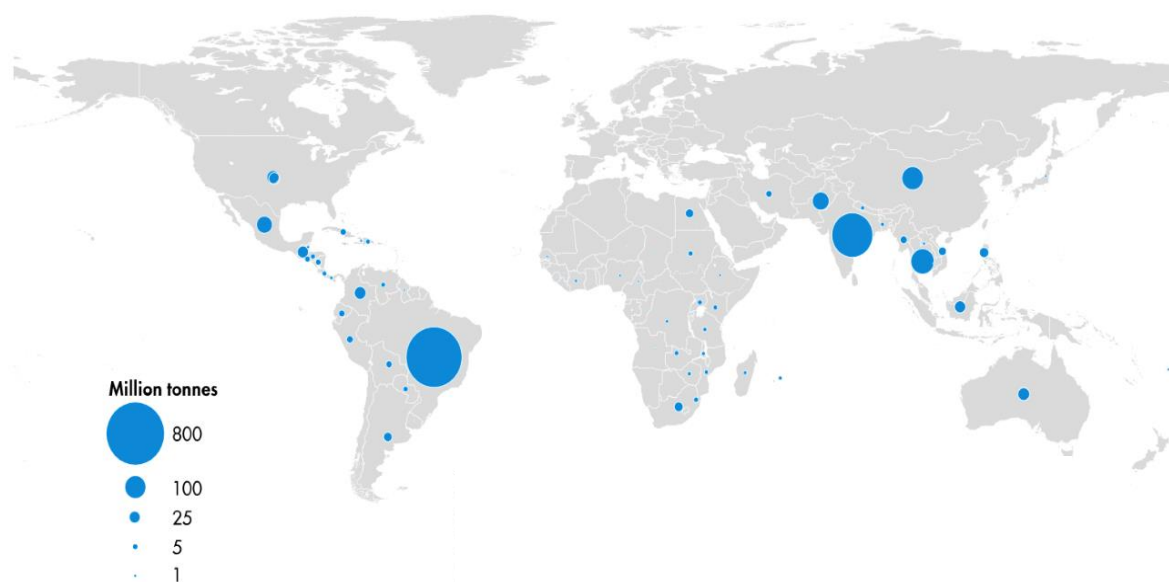
A agricultura é uma atividade impulsionadora da economia brasileira, onde o desenvolvimento desse setor se deu em grande parte em áreas do Cerrado, que é bastante conhecido por ser uma região de topografia plana, que facilita a mecanização, com áreas naturalmente férteis (Costa; Borges, 2009; Silva et al., 2021). De acordo com Dutra (2019), o Cerrado é um bioma que se encontra em um estágio de maturidade evolutiva, isto é, já alcançou o clímax no que tange ao seu processo de formação, pensado a partir de uma perspectiva ambientalmente dinâmica, com um sistema biogeográfico, sobretudo do Cerrado goiano, classificado como a savana mais rica do planeta quanto à biodiversidade (Dutra, 2019).

Com isso o Brasil é considerado um país que conta com uma grande área cultivável e com clima que favorece várias culturas, principalmente a da cana-de-açúcar, um dos motivos que faz do Brasil o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. O setor sucroalcooleiro é um dos segmentos mais importantes do agronegócio no país e de acordo com a CONAB a safra de 2021/22 registrou um total de 585,2 milhões de toneladas. Segundo a FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, a produção anual de cana-de-açúcar está

distribuída em mais de 100 países, atingindo 1,89 bilhão de toneladas. Em 2019, a produção global de cana-de-açúcar (Fig. 1) foi liderada pelo Brasil (768 Mt), Índia (348 Mt), China (123 Mt) e Tailândia (87 Mt).

A cultura da cana-de-açúcar desempenha um papel vital na economia dos países em desenvolvimento. Neste cenário, o Brasil atua como importante produtor e exportador de commodities e se mostra como um dos países mais importantes para suprir parte dessa demanda futura, devido ao seu potencial de expansão das áreas agrícolas e produtividade das lavouras.

Figura 1. Principais países produtores de cana-de-açúcar do mundo.



Fonte: Food and Agriculture Organization (FAO)

Sendo assim, para melhorar a qualidade das lavouras de cana-de-açúcar e aumentar a produtividade, os produtores investem na correção do solo, melhoramento genético, sistema irrigado. (EMBRAPA, 2018) e em alguns casos a agricultura de precisão, que vem sendo adotada em áreas canavieiras do Brasil, fazendo uso de ferramentas mais sofisticadas e modernas para otimizar o sistema agrícola.

Nesse sentido, para elevar a produtividade das áreas de lavouras devemos contar com meios mais eficientes de monitoramento (Formaggio; Sanches, 2017; Wheeler; Von Braun, 2013; Weiss; Jacob; Duveiller, 2020) de áreas. Dentro desse contexto, o presente estudo objetiva o uso ferramentas da agricultura de precisão para conhecer variabilidade da área de estudo a fim de obter uma agricultura sustentável com maior assertividade, maiores índices de produtividade e redução de custos, considerando o potencial e a necessidade de cada ponto por meio da ferramenta geoestatística e do sensoriamento remoto.

Dessa forma, a tese foi dividida em capítulos. No capítulo 1, tem-se uma revisão de literatura levando em consideração estudos com enfoque na cultura da cana de açúcar e nas ferramentas utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa. No capítulo 2, apresentamos um estudo da Dinâmica temporal da fertilidade do solo em área de cana-de-açúcar com ênfase na produção sustentável. O capítulo 3, traz um estudo acerca da variabilidade do NDVI, por meio do sensor MODIS, usando a análise fractal. No capítulo 4, temos os resultados encontrados nos dois artigos que compuseram a tese.

1.2 Revisão De Literatura

1.2.1 A importância da cana-de-açúcar no cenário mundial e brasileiro

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) se destaca como uma das principais culturas agrícolas de forte impacto econômico no mundo, uma vez que é cultivada em mais de 100 países e pode potencialmente reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), devido sua capacidade de sintetizar e armazenar altas concentrações de sacarose no colmo, sendo também matéria prima para produção de açúcar e etanol (Martíni et al., 2020, Zhao et al., 2022).

Segundo o último levantamento da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), a produção anual de cana-de-açúcar nos mais de 100 países produtores da cultura foi de 1,89 bilhão de toneladas em uma área de 27.000.000 ha. A produção global de cana-de-açúcar atualmente é liderada pelo Brasil, seguido dos países Índia, China e Tailândia. Além desses países, a cana-de-

açúcar é cultivada em diversas regiões tropicais e subtropicais, e atualmente o Brasil, é o país com maior potencial de produção da cultura, sendo um dos principais fornecedores de açúcar e etanol no mundo (FAO, 2021).

Tal feito, se dá principalmente em decorrência do país possuir condições edafoclimáticas favoráveis para o desenvolvimento da cultura, uma vez que a cultura se trata de uma planta C4, com alta taxa fotossintética e alta eficiência de conversão de energia radiante em energia química, sendo cultivada em solos distintos sob influência de diferentes climas, o que resulta em vários tipos de ambiente de produção da cultura, além de possuir áreas que ainda podem ser exploradas para implantação da cana-de-açúcar (Cavalcanti et al., 2019).

Essa liderança na produção tem marcado a importância da cultura para o país no cenário mundial e assumido papel de destaque no contexto socioambiental como alternativa para a substituição parcial da utilização de combustíveis fósseis frente aos acordos internacionais de redução de gases de efeito estufa (Follador et al., 2021).

Na safra de 2021/22 a produção nacional de cana-de-açúcar totalizou 585,3 milhões de toneladas, em uma área colhida de 8.316 mil hectares, com produtividade média de 70.357 kg ha⁻¹. O Sudeste do Brasil foi a região com maior participação e respondeu por 62,7% (366.929,9 mil t) do total de produção, seguida da região Centro-Oeste, responsável por 22,4% (131.370,3 mil t), do Nordeste com 8,7% (51.062,1 mil t), Sul com 5,5% (31.961,6 mil t) e o Norte com apenas 0,7% (3.855,53 mil t) do total de produção. A produtividade de cana na safra 2022/2023 está estimada em 598,2 milhões de toneladas distribuídas em 8,3 milhões de hectares, com uma produção de açúcar em torno de 36,37 milhões de toneladas e 26,59 bilhões de litros de etanol. (CONAB 2022).

De maneira geral observa-se que o setor sucroalcooleiro no Brasil e no mundo está consolidado e em plena ascensão, principalmente pela sinergia entre a produção de açúcar e o bioetanol. Portanto, a exploração da cana-de-açúcar compreende um dos casos de maior sucesso das usinas tradicionais, assim como biorrefinarias, devido aos três principais produtos comercializáveis, especificamente açúcar, etanol e bioeletricidade, bem como a grande diversidade de subprodutos derivados, como palha, melaço, vinhaça, dentre outros (Vandenberghe et al. 2022).

Do ponto de vista político, outros fatores são mencionados, como garantir a segurança energética, reduzir as emissões de gases de efeito estufa, aumentar a diversificação dos rendimentos dos agricultores e das comunidades rurais, além da grande geração de empregos diretos e indiretos da indústria sucroalcooleira (Gómez-Merino et al., 2014).

Apesar dessa importância da cana-de-açúcar para a economia do país e mundial, atualmente assiste-se a um extenso debate sobre as vantagens e desvantagens da expansão da produção de etanol, uma vez que a maior parte das áreas com cana-de-açúcar utilizam sistemas convencionais de produção, com cultivos sucessivos em uma mesma área e uso intensivo de agroquímicos (inseticidas, fungicidas, herbicidas, nematicidas, entre outros), e fertilizantes minerais (principalmente em regiões com maior predominância de solos ácidos e com baixa fertilidade natural) que são responsáveis por impactos ambientais potenciais, causados a qualidade do ar, do clima e da água (Marasca et al., 2016, Bordonal et al., 2018; Canisares et al., 2019).

Esse cenário tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas de alta relevância voltadas para o cultivo de cana-de-açúcar mais sustentável, como por exemplo, a aplicação de ferramentas da Agricultura de precisão, principalmente quando aplicadas ao estudo do solo.

1.2.2 Variabilidade dos atributos físicos e químicos do solo

O solo é um dos componentes mais importantes do meio ambiente (Ellis e Mellor, 1995). É um recurso natural que auxilia no crescimento e desenvolvimento de plantas (Lepsch, 2002; Montanari 2016) de grande relevância para muitas atividades econômicas, principalmente para a agricultura, onde se faz necessária a adoção de estratégias que permitam o uso racional (Moura et al., 2007) e um manejo que garanta condições adequadas de desenvolvimento.

Segundo Andrews et al. (2002), a qualidade do solo é um dos três componentes da qualidade ambiental. Ela é definida como a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra para sustentar a

produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a flora e saúde animal (Doran e Parkin, 1994; Doran e Parkin, 1996). Alcançar ou manter essa qualidade do solo requer um manejo adequado e a compreensão dos padrões de distribuição dos atributos do solo na natureza. O conhecimento da distribuição dos atributos do solo ajuda a estabelecer áreas para o desenvolvimento agrícola e manejo sustentável da terra, ajudando na caracterização das propriedades para o desenvolvimento agrícola (Ma, Minasny e Wu, 2017), dando a possibilidade de intervir de acordo as necessidades de cada áreas (Arruda, Demattê e Chagas, 2013).

Em virtude de seus processos pedogenéticos, os solos apresentam heterogeneidade natural (Buol et al., 1997; Cavalcante et al., 2007). Fatores de origem natural ou antrópica, geram a variabilidade espacial dos atributos do solo (Carvalho et al., 2003), logo, à medida que os solos são usados, a variabilidade espacial encontrada na natureza vai aos poucos sendo alterada pelos efeitos do preparo do solo, efeitos residuais de fertilizantes e corretivos, sistemas de manejo empregados, e em alguns casos, os fatores podem aumentar ou diminuir a heterogeneidade do solo (Carvalho et al., 2003; Burak, Passos e Andrade, 2012). A variação espacial deve ser levada em consideração durante a fase de amostragem do solo, a fim de identificar qual manejo e qual análise se faz necessário (Vieira, 2004), reduzindo assim os custos e mão-de-obra do trabalho (Corá et al., 2004).

Desse modo, para a compreensão da variabilidade dos atributos do solo tem-se aplicado métodos geoestatísticos que fornecem uma análise e descrição mais detalhada, permitindo o aumento da rentabilidade dos sistemas agrícolas (Bernardi et al., 2014).

1.2.3 O Uso de Sensoriamento Remoto na Agricultura

A agricultura desempenha um papel insubstituível no cenário mundial e mesmo com os recentes ganhos de produtividade (Foley et al., 2011; Sishodia, Ray, Singh, 2020), estudos demonstram que até o ano de 2050 será necessário quase que duplicar a produtividade agrícola para alimentar os 9 bilhões de pessoas.

Grande parte deste crescimento dar-se-á no segundo maior bioma da América do Sul, o Cerrado (Silva Teixeira; Fonseca, 2022), que desde a década de 70 tornou-se o foco das novas expansões agropecuárias (Santana et al., 2020; Victoria et al., 2020). Sabendo que as áreas de cultivo não podem consideradas homogêneas e as variações que ocorrem nela devem ser levadas em consideração (Rodrigues e Barros, 2019), precisamos elevar a produtividade das áreas de lavouras podendo contar a cada dia com meios mais eficientes de monitoramento (Formaggio; Sanches, 2017; Wheeler; Von Braun, 2013; Weiss, Jacob; Duveiller, 2020), para alimentar a população.

Para atender essa necessidade, temos a Agricultura de Precisão (AP) que com um conjunto de tecnologias, analisam e gerenciam essa variabilidade que possa vir a ocorrer nas lavouras, o que contribui para um melhor índice de produtividade (Liu et al., 2019; Astapova, Uzdiaev, 2022). Dentro deste conjunto de tecnologia temos a geoestatística e o sensoriamento remoto. A geoestatística aplicada a agricultura de precisão garante uma melhor precisão no mapeamento de dados interpolados no espaço (Grego et al., 2020; Souza et al., 2004).

De acordo com Yamamoto e Landim (2013) a geoestatística tem por objetivo a caracterização espacial de uma determinada variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, com a determinação das incertezas associadas, onde para atingir esse objetivo os métodos usados pela geoestatística fazem uso de semivariogramas como ferramenta central para avaliar se os dados estudados apresentam ou não dependência espacial e em caso positivo realizar a quantificação dessa dependência (Castrignanò et al., 2017; Rodrigues et al., 2020).

Em adição, temos a aplicação do sensoriamento, caracterizada pela aquisição de determinado objeto sem a necessidade de contacto físico e por muitas vezes à longas distâncias (Inamasu; Bernardi 2014; Santos, 2019), a aplicação na agricultura data do primeiro lançamento do satélite Landsat Multispectral Scanner System (MSS) em 1972 (Khanal, et al., 2020).

Na agricultura, os satélites usados no sensoriamento remoto (Ippoliti et al., 1999; Oliveira, Andrade, Magalhaes Junior, 2023; Queiroz et al., 2022), fotografam áreas de interesse e as armazenam em um banco de dados, que por meio de

plataformas digitais geram imagens e mapas históricos o que facilita a análise do desenvolvimento da lavoura e nas tomadas de decisão (Li, et al., 2022; Roznik, Boyd, Porth, 2022; Puttinaovarat, Khaimook e Horkaew, 2023).

Assim sendo, com o uso de dados de satélite é possível prever o rendimento das culturas e monitorar o a produção agrícola. Dessa forma, muitos pesquisadores têm enfatizado o uso de dados de satélite e os dados do NDVI para a previsão do rendimento das culturas (Huete, et al., 2002; Ren, et al., 2008; Yu E Shang, et al., 2018). Uma das primeiras obtenções de dados remotamente foi a detecção de diferenças na refletância, relacionadas à densidade da cobertura vegetal.

O índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI), é uma importante aplicação de sensoriamento remoto, com boa resolução espacial (Lee, Hwang, Cho, 2021; Xu, et al., 2022). Introduzido na década de 1970 (Pelta, Beerli, Shilo, 2022; Rouse, et al., 1974), até hoje é o índice mais usado para monitorar a vegetação por meio de imagem de satélite (Jabal, Khayyun e Alwan, 2022). Isso por causa de sua série de dados de longo prazo, simplicidade e facilidade de uso (KONG, et al., 2017). O NDVI utiliza as faixas visível do vermelho e do infravermelho próxima do espectro eletromagnético para quantificar a densidade da vegetação em uma determinada área (Galvêncio, 2019). O NDVI é uma razão da diferença entre as porções vermelha e infravermelha do espectro eletromagnético. Os valores do índice vão de -1 a 1, sendo calculado de acordo com a fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Onde o:

NDVI se refere ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

NIR é a faixa do infravermelho próximo (750-1.350 nm);

RED é a faixa do vermelho (620-750 nm).

As séries temporais dos índices de vegetação tem sido utilizadas por meio de produtos com alta resolução temporal como o Moderate Resolution Imaging

Spectroradiometer – MODIS (Arantes, et al 2022; Leivas et al., 2022; Verbesselt et al., 2010), devido à clorofila absorver na faixa do visível, enquanto não absorve no infravermelho próximo. Sendo assim, esses dados tornam-se importantes para se relacionar as variáveis diretas nos processos fotossintéticos.

O MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) é um sensor remoto de resolução espectral que se encontra a bordo dos satélites Terra e Aqua, pertencente a Earth Observing System (EOS), financiado pelo programa Earth Science Enterprises (ESE) da NASA. O sensor atua com 36 bandas espectrais, que abrange as faixas situadas no intervalo de 0,407 μm a 14,385. O sensor MODIS tem frequência temporal que detecta tipos de culturas e outras práticas de uso da terra (Wardlow e Egbert, 2008) em ciclos repetidos e frequentes, chegando a detectar até duas vezes por dia em cada ponto (Zhu, Radeloff; Ives, 2017), com respostas baseada na composição temporal, considerando o melhor valor da refletância do pixel (Didan; Barreto Munoz, 2019). Dessa forma o MODIS tem sido usado para estimar o rendimento de culturas devido a sua resolução espacial pequena, variando de centenas de metros a quilômetros (He et al., 2018; Panek et al., 2020; Petersen; Gozdowski, 2018).

Embora existia “n” formas para tomar decisões em relação a áreas produtivas o conhecimento da variabilidade da produção facilita definir quais práticas agrícolas podem ser empregadas de forma eficaz para melhorar o índice de produção e reduzir custos. Outra ferramenta que pode ser aplicada nos estudos de variabilidade de atributos e produção e como eles interage entre si é a análise fractal, que tem como principais objetivos a otimização e sustentabilidade no desenvolvimento de culturas.

1.2.4 Teorias e Aplicações da Análise Fractal

Os fractais se tornaram popular em razão da promessa de compreender de forma mais profunda dos sistemas complexos, caóticos e desordenados, que resistiram às tentativas geométricas convencionais de modelá-los (Pippa, et al., 2013). Ao contrário da teoria euclidiana, a geometria fractal é uma ferramenta útil

para lidar com fenômenos fragmentados e irregulares na natureza, que permite que as medidas mudem de forma não inteira ou fracionária quando a unidade de medida muda.

Uma vez que a teoria fractal é uma ciência que se concentra em objetos geométricos complexos e aleatórios que apresentam autossimilaridades são e invariantes em escala (Mandelbrot e Wheeler, 1978). Assis et al. (2008) afirmam que um fractal é um objeto invariante na sua forma quando a escala é alterada, e se mantém idêntico a sua estrutura à original.

O termo fractal foi usado pela primeira vez por Benoit Mandelbrot, em 1975, foi usado para descrever a geometria real das formas da natureza, quando descobriu que os objetos não só têm dimensão inteira, mas também, dimensão fractal. Fractal vem do latim, *fractus*, que significa quebrar, criar fragmentos. São caracterizados por sua a autossemelhança, complexidade infinita e a sua dimensão (Nayak, Mishra, Palai, 2019; Pachepsky 2000), ou seja, o mesmo padrão geométrico é identificado em qualquer escala que se olhe para os fractais (Lazzari, et al., 2016).

- A autossemelhança é identificada quando uma porção, de uma figura ou de um contorno, pode ser vista como uma réplica do todo, numa escala menor (Andrade et al., 2008).

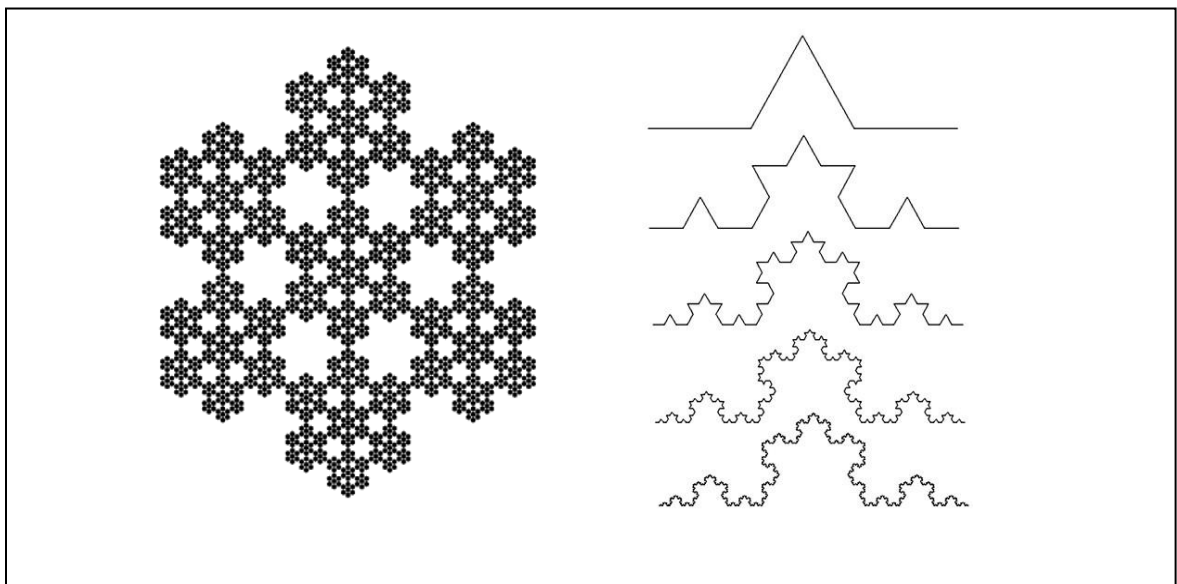


Figura 2. Níveis da Curva de Koch

- A complexidade infinita está ligada a geração da figura. Nesse caso, quanto maior for o número de repetições desse processo, mais detalhes serão apresentados e por fim, conseguiremos representar a figura no seu todo (Curva de Koch). A representação de um fractal vai se tornando complicada à medida que cresce a complexidade, pois são figuras que têm detalhes infinitos.
- A dimensão se refere à estrutura de ocupação do espaço, caracterizando a superfície de contato entre o objeto e o meio.

O parâmetro mais importante da geometria fractal é a dimensão, que é capaz de descrever de forma direta as características geométricas dos materiais (Zhang, et al., 2017). O termo dimensão fractal refere-se a uma dimensão não inteira de um objeto geométrico (Esteller; Vachtsevanos; Echauz; Litt, 2001). Na geometria Euclidiana, um ponto qualquer apresenta dimensão 0, uma linha apresenta dimensão 1, um quadrado ou um retângulo têm dimensão 2 e um volume no espaço apresenta dimensão 3. Já um fractal em um plano apresenta uma dimensão entre 1 e 2, e quando está no espaço, um fractal terá uma dimensão entre 2 e 3.

Segundo Joye (2011), os fractais apresentam uma dimensão não-integral por ocuparem mais espaço do que uma simples linha (como a primeira dimensão), no entanto, não ocupam todo o plano. Sendo assim, a dimensão deve ser menor ou igual à dimensão do espaço em que o fractal existe, ou então o espaço não pode conter o fractal (Schmidt e Avnir, 1989). A dimensão fractal é capaz de descrever a complexidade do sistema fractal autossimilar rigoroso ou estatístico (Cai; Tian; Wood, 2022), podendo fornecer algumas informações novas que os parâmetros tradicionais não contêm (Xu, 1993). No caso, aqueles que não puderam ser analisados pela geometria euclidiana (Nayak, et al., 2019), como por exemplo estrutura complexa do solo, o processamento de imagens, a descrição da conversão de escala do índice de área foliar ou a conversão de aumento de escala de NDVI (Zhang et al, 2008, 2010; Wu et al., 2016).

Considerando que o perfil do solo apresenta diversas estruturas naturais, tais como partículas, poros e organismos, que variam de tamanhos e formas, favorecendo as características irregulares, diversos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos não permanecem constantes ao longo do tempo e do espaço e ocorrem em diferentes escalas espaciais (Perfect & Kay, 1995). Nesse sentido, a utilização de parâmetro fractais como a dimensão fractal pode descrever essa estrutura complexa do solo, pois investigam e caracterizam quantitativamente a variabilidade espacial (Mandelbrot, 1982). Aliando esse parâmetro com outras alterações podemos ter refletidos os efeitos do manejo nos atributos do solo (Pachepsky & Crawford, 2004).

Diante do exposto, a dimensão fractal vem sendo usada no estudo em diversos campos, o que tem contribuído de forma expressiva para o avanço das novas ciências que estudam a imprevisibilidade dos fenômenos da natureza. Na análise da variabilidade do solo, pode fornecer alternativas de manejo não só para reduzir os efeitos da variabilidade encontrada (Trangmar et al., 1985), mas também para aumentar a possibilidade de estimar respostas das culturas sob determinadas práticas de manejo. No sensoriamento remoto a dimensão fractal tem sido usada na análise espacial do NDVI, pois pode medir a heterogeneidade em diferentes estágios da cultura e quando comparada a outros métodos de aprimoramento de imagem, as características fractais podem ser consideradas estáveis e independentes, podendo ser usados para extração de informações e de classificação de recursos (Xia; Feng; Zhao, 2006; Parrinello; Vaughan, 2002). Nesse sentido, estudar a diferença de escala e variações encontradas em áreas de lavoura podem ajudar na compreensão da dinâmica da vegetação e sua interação com outros componentes.

1.3 Referências

Andrade RF, Assis TA, Vivas Miranda JG, Mota FD, Castilho CM (2008) 'Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais', **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 30(2):2304.1–2304.10, doi:10.1590/s1806-11172008000200005.

Arantes CS, Speranza EA, Antunes J, Barbosa L, Cançado, GDA (2022). Complemento no QGIS para monitoramento de áreas de cana-de-açúcar por meio de índices vegetativos MODIS, 2022.

Arruda GP, Demattê JA, Chagas CD, Fiorio PR, Souza AB, Fongaro CT (2016) Digital soil mapping using reference area and artificiais neurais networks', **Scientia Agricola**, 73(3):266–273, doi:10.1590/0103-9016-2015-0131.

Astapova M, Uzdiaev M (2022), November). Statistical Analysis of NDVI of Agricultural Land Cover Aerial Images. In Agriculture Digitalization and Organic Production: Proceedings of the Second International Conference, ADOP (2022). St. Petersburg, Russia, June 06–08, 2022 (pp. 283-292). Singapore: Springer Nature Singapore.

Bordonal RD, Carvalho JL, Lal R, de Figueiredo EB, de Oliveira BG, La Scala N (2018) 'Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review', **Agronomy for Sustainable Development**, 38(2), doi:10.1007/s13593-018-0490-x.

Burak DL, Passos RR, Andrade FV (2012) 'Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo', **Bragantia**, 71(4):538–547, doi:10.1590/s0006-87052012000400012.

Cai J, Tian Z, Wood DA (2022) 'Pore-scale characterization and fractal analysis for gas migration mechanisms in shale gas reservoirs', in Sustainable Geoscience for Natural Gas Subsurface Systems, **Elsevier**, doi:10.1016/b978-0-323-85465-8.00009-1.

Campos, A. C; Batista, V. M. Sistema biogeográfico do Cerrado goiano: o Parque Ecológico Altamiro de Moura Pacheco. I Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, IBEAS, 2010. 4.

Canisares LP, Cherubin MR, Silva LF, Franco AL, Cooper M, Mooney SJ, Cerri CE (2020) 'Soil microstructure alterations induced by land use change for sugarcane expansion in Brazil', **Soil Use and Management**, 36(2):189–199, doi:10.1111/sum.12556.

Carvalho MP, Takeda EY, Freddi OS (agosto de 2003) 'Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP)', **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27(4):695–703, doi:10.1590/s0100-06832003000400014.

Carvalho-Netto OV, Bressiani JA, Soriano HL, Fiori CS, Santos JM, Barbosa GV, Xavier MA, Landell MG, Pereira GA (2014) 'The potential of the energy cane as the main biomass crop for the cellulosic industry', **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, 1(1), doi:10.1186/s40538-014-0020-2.

Castrignanò A, Buttafuoco G, Quarto R, Vitti C, Langella G, Terribile F, Venezia A (3 de dezembro de 2017) 'A Combined Approach of Sensor Data Fusion and Multivariate Geostatistics for Delineation of Homogeneous Zones in an Agricultural Field', **Sensors**, 17(12):2794, doi:10.3390/s17122794.

Cavalcante, E. G. S.; Alves, M. C.; Pereira, G. T.; Souza, Z. M. de. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 394-400, 2007.

Cavalcante EG, Alves MC, Pereira GT, Souza ZM (abril de 2007) 'Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos', **Ciência Rural**, 37(2):394–400, doi:10.1590/s0103-84782007000200015.

Cavalcanti RQ, Rolim MM, de Lima RP, Tavares UE, Pedrosa EM, Gomes IF (junho de 2019) 'Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil', **Soil and Tillage Research**, 189:140–147, doi:10.1016/j.still.2019.01.006.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Cana-de-açúcar, V.6, Safra 2021/2022, N.4 – Quarto levantamento, Abril 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download>. Acesso em: 17 de março de 2023.

Corá JE, Araújo AV, Pereira GT, Beraldo JMG (2004) Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do solo** 28:1013-1021

Didan K, Barreto Munoz A. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). Version 3.1; University of Arizona: Tucson, AZ, USA, 2019. Acesso em: 03 fev. 2023.

Dutra, R. M.S. Cerrado Goiano: Agrotóxicos e agroextrativismo. Goiânia: Ed. IFG, 2019.

Eghball B, Hergert GW, Lesoing GW, Ferguson RB (março de 1999) 'Fractal analysis of spatial and temporal variability', **Geoderma**, 88(3-4):349–362, doi:10.1016/s0016-7061(98)00113-x.

Ellis S, Mellor T. (1995). Solos, Meio Ambiente (1ªed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203415245>

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. COMUNICADO TECNICO 216. Aracaju. Dezembro, 2018.

Esteller R, Vachtsevanos G, Echauz J, Litt B (2001) 'A comparison of waveform fractal dimension algorithms', IEEE Transactions on Circuits and Systems I: **Fundamental Theory and Applications**, 48(2):177–183, doi:10.1109/81.904882.

FAO (2021). The agricultural production indices. Food and Agricultural Organisation of the United Nations. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 17 março de 2022.

Fa-Sheng ZHANG, Zuo-Xin LIU. (2011). Fractal theory and its application in the analysis of soil spatial variability: A review. **Yingyong Shengtai Xuebao**, 22(5).

Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, Mueller ND, O'Connell C, Ray DK, West PC, Balzer C, Bennett EM, Carpenter SR, Hill J, Monfreda C, Polasky S, Rockström J, Sheehan J, Siebert S, Tilman D, Zaks DP (2011) '**Solutions for a cultivated planet**', **Nature**, 478(7369):337–342, doi:10.1038/nature10452.

Follador M, Soares-Filho BS, Philippidis G, Davis JL, de Oliveira AR, Rajão R (2 de julho de 2021) 'Brazil's sugarcane embitters the EU-Mercosur trade talks', **Scientific Reports**, 11(1), doi:10.1038/s41598-021-93349-8.

Formaggio, A. R., & Sanches, I. D. A. (2017). Sensoriamento remoto em agricultura. Oficina de Textos.

Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Senties-Herrera HE (2014) 'Sugarcane as a Novel Biofactory: Potentialities and Challenges', in Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in the Century XXI, Springer International Publishing, doi:10.1007/978-3-319-03880-3_5.

Grego CR, Speranza EA, Rodrigues GC, Luchiari Junior A, Vendrusculo LG, Rodrigues CAG, Ronquim CC. (2020). Tecnologias desenvolvidas em Agricultura de Precisão.

He M, Kimball J, Maneta M, Maxwell B, Moreno A, Beguería S, Wu X (28 de fevereiro de 2018) 'Regional Crop Gross Primary Productivity and Yield Estimation Using Fused Landsat-MODIS Data', **Remote Sensing**, 10(3):372, doi:10.3390/rs10030372.

Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (novembro de 2002) 'Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices', **Remote Sensing of Environment**, 83(1-2):195–213, doi:10.1016/s0034-4257(02)00096-2.

Inamasu, R. Y., & Bernardi, A. D. C. (2014). Agricultura de precisão.

Ippoliti-Ramilo GA, Epiphany JCN, Shimabukuro YE, Formaggio AR (1999). Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras. Agricultura em São Paulo, 46, 89-101.

Jabal ZK, Khayyun TS, Alwan IA. (2022). Impact of climate change on crops productivity using MODIS-NDVI time series. Civil Engineering Journal, 8(06).

Joye Y (2011) 'A Review of the Presence and Use of Fractal Geometry in Architectural Design', **Environment and Planning B: Planning and Design**, 38(5):814–828, doi:10.1068/b36032.

Katul G, Lai C-T, Schäfer K, Vidakovic B, Albertson J, Ellsworth D, Oren R (novembro de 2001) 'Multiscale analysis of vegetation surface fluxes: from seconds to years', *Advances in Water Resources*, 24(9-10):1119–1132, doi:10.1016/s0309-1708(01)00029-x.

Khanal S, KC K, Fulton JP, Shearer S, Ozkan E (2020) 'Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities', **Remote Sensing**, 12(22):3783, doi:10.3390/rs12223783.

Kong D, Zhang Q, Singh VP, Shi P (2017) 'Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982–2013)', **Global and Planetary Change**,

148:1–8, doi:10.1016/j.gloplacha.2016.10.020.

Lazzari S, Nicoud L, Jaquet B, Lattuada M, Morbidelli M (setembro de 2016) 'Fractal-like structures in colloid science', **Advances in Colloid and Interface Science**, 235:1–13, doi:10.1016/j.cis.2016.05.002.

Lee G, Hwang J, Cho S (2021) 'A Novel Index to Detect Vegetation in Urban Areas Using UAV-Based Multispectral Images', **Applied Sciences**, 11(8):3472, doi:10.3390/app11083472.

Leivas JL, Teixeira AH, Takemura CM, Garçon EA (2022) 'ANÁLISE DA DINÂMICA TEMPORAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI, EVI, SAVI E IRECI ATRAVÉS DE IMAGENS SENTINEL-2A E MODIS', in Ciências Agrárias: o avanço da ciência no Brasil - Volume 4, **Editora Científica Digital**, doi:10.37885/220709585.

Lepsch IF (2002) Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 178p.

LIU C-A, CHEN Z-X, SHAO Y, CHEN J-S, Hasi T, PAN H-Z (março de 2019) 'Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: A review', **Journal of Integrative Agriculture**, 18(3):506–525, doi:10.1016/s2095-3119(18)62016-7.

Ma Y, Minasny B, Wu C (setembro de 2017) 'Mapping key soil properties to support agricultural production in Eastern China', **Geoderma Regional**, 10:144–153, doi:10.1016/j.geodrs.2017.06.002.

Mandelbrot B (1967) 'How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension', **Science**, 156(3775):636–638, doi:10.1126/science.156.3775.636.

Mandelbrot BB, Wheeler JA (1983) 'The Fractal Geometry of Nature', **American Journal of Physics**, 51(3):286–287, doi:10.1119/1.13295.

Marasca I, Fernandes BB, Caterina GL, Denadai MS, Lanças KP (28 de agosto de 2016) 'Chemical properties of ultisol in different tillage systems under sugarcane cultivation', **ENERGIA NA AGRICULTURA**, 31(2):200, doi:10.17224/energagric.2016v31n2p200-206.

Martíni AF, Valani GP, Boschi RS, Bovi RC, Simões da Silva LF, Cooper M (outubro de 2020) 'Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review', **Soil and Tillage Research**, 204:104751, doi:10.1016/j.still.2020.104751.

Mohlin K, Camuzeaux JR, Muller A, Schneider M, Wagner G (maio de 2018) 'Factoring in the forgotten role of renewables in CO2 emission trends using decomposition analysis', **Energy Policy**, 116:290–296, doi:10.1016/j.enpol.2018.02.006.

Mondardo, M. L., & de Azevedo, J. R. N. (2019). MATOPIBA: DO DOMÍNIO DA TERRA E ABUSO DA ÁGUA AOS TERRITÓRIOS DE RESISTÊNCIAS DAS POPULAÇÕES TRADICIONAIS/MATOPIBA: from the domain of land and water abuse to the territories of resistance of the traditional populations/MATOPIBA: del dominio de la tierra y abuso del agua a los territorios de resistencias de las poblaciones tradicionales. **Revista Nera**, (47), 296-320.

Montanari R (2016) **Atributos do solo e componentes produtivos da cultura da pupunha : uma abordagem linear, geoestatística e multivariada**, Ilha Solteira, consultado em 01 de abril de 2023.

Moura LC, Marques AFSM, Hadad RM, Andrade H, Alves HMR (2007) A aptidão agrícola das terras do município de Machado/ MG e a cafeicultura. *Caderno de Geografia* 17:141-162.

Nayak SR, Mishra J, Palai G (setembro de 2019) 'Analysing roughness of surface through fractal dimension: A review', **Image and Vision Computing**, 89:21–34, doi:10.1016/j.imavis.2019.06.015.

Oliveira PD, Hott MC, Andrade RG, Magalhaes Junior, WCP. (2023). Aplicações da agricultura de precisão em pastagens.

Pachepsky Y, Crawford JW, Rawls WJ. (Eds.). (2000). *Fractals in soil science*. Elsevier.

Pachepsky Y, Crawford, J. W. Fractal analysis. In: HILLEL, D. (Ed.). *Encyclopedia of soils in the environment*. Waltham: Academic Press, 2004. v. 2, p. 85-98.

Panek E, Gozdowski D (janeiro de 2020) 'Analysis of relationship between cereal

yield and NDVI for selected regions of Central Europe based on MODIS satellite data', **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 17:100286, doi:10.1016/j.rsase.2019.100286.

Parrinello T, Vaughan R. Análise multifractal e extração de características em imagens de satélite. *Int. J. Remote Sens.* 2002

Pelta R, Beerli O, Tarshish R, Shilo T (2022) 'Sentinel-1 to NDVI for Agricultural Fields Using Hyperlocal Dynamic Machine Learning Approach', **Remote Sensing**, 14(11):2600, doi:10.3390/rs14112600.

Perfect E, Kay, B. D. (1995) 'Applications of fractals in soil and tillage research: a review', **Soil and Tillage Research**, 36(1-2):1–20, doi:10.1016/0167-1987(96)81397-3.

Petersen L (2018) 'Real-Time Prediction of Crop Yields From MODIS Relative Vegetation Health: A Continent-Wide Analysis of Africa', **Remote Sensing**, 10(11):1726, doi:10.3390/rs10111726.

Pippa N, Dokoumetzidis A, Demetzos C, Macheras P (2013) 'On the ubiquitous presence of fractals and fractal concepts in pharmaceutical sciences: A review', **International Journal of Pharmaceutics**, 456(2):340–352, doi:10.1016/j.ijpharm.2013.08.087.

Pirmoradian N, Sepaskhah AR, Hajabbasi MA (2005) 'Application of Fractal Theory to quantify Soil Aggregate Stability as influenced by Tillage Treatments', **Biosystems Engineering**, 90(2):227–234, doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.11.002.

Puttinaovaratt S, Khaimook K, Horkaew P (2023) 'Land use and land cover classification from satellite images based on ensemble machine learning and crowdsourcing data verification', **International Journal of Cartography**, 1–21, doi:10.1080/23729333.2023.2166252.

Queiroz DM, Valente DSM, Carvalho Pinto FDA, Borém A. (Eds.). (2022). **Agricultura digital**. Oficina de Textos.

Ren J, Chen Z, Zhou Q, Tang H (2008) 'Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China', **International Journal of Applied**

Earth Observation and Geoinformation, 10(4):403–413, doi:10.1016/j.jag.2007.11.003.

Rodrigues SS, Barros MM. (2018). O Uso de VANT e do Sensoriamento Remoto como Ferramenta de Melhoria das Técnicas de Agricultura de Precisão. **Corpo Editorial**, 61.

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA Spec. Publ**, 351(1), 309.

Roznik M, Boyd, Porth L. (2022). Improving crop yield estimation by applying higher resolution satellite NDVI imagery and high-resolution cropland masks. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 25, 100693.

Saiedi N, Besalatpour AA, Shirani H, Abbaszadeh Dehaji P, Esfandiarpour I, Faramarzi M (setembro de 2017) 'Aggregation and fractal dimension of aggregates formed in sand dunes stabilized by PistachioPAM and PistachioPVAc mulches', **European Journal of Soil Science**, 68(5):783–791, doi:10.1111/ejss.12458.

Santana CAM, Campos SK, Marra R, Aragão AA. (2020). Cerrado: pilar da agricultura brasileira.

Santos, JCO, A Aplicação do Sistema de Informação Geográfica em Estudos Ambientais In: **Revista Digital Simonsen**, N^o, 2019. Disponível em: www.simonsen.br/revistasimonsen ISSN:2446-5941.

Schmidt PW, Avnir D. (1989). The fractal approach to heterogeneous chemistry. **JohnWiley and Sons Inc.**, New York.

Silva Teixeira RD, Da Fonseca VM (2022) 'A expansão da fronteira agrícola nos biomas brasileiros: O cerrado como laboratório para os pacotes tecnológicos da "revolução verde" / The expansion of the agricultural frontier in brazilian biomes: The cerrado as a laboratory for the technological packages of the "green revolution"', **Brazilian Journal of Development**, 8(1):6416–6435, doi:10.34117/bjdv8n1-434.

Sishodia RP, Ray RL, Singh SK (24 de setembro de 2020) 'Applications of Remote

Sensing in Precision Agriculture: A Review', **Remote Sensing**, 12(19):3136, doi:10.3390/rs12193136.

Souza ZM, Marques Júnior J, Pereira GT (maio de 2004) 'Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes', **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39(5):491–499, doi:10.1590/s0100-204x2004000500012.

Tagar AA, Adamowski J, Memon MS, Do MC, Mashori AS, Soomro AS, Bhayo WA (março de 2020) 'Soil fragmentation and aggregate stability as affected by conventional tillage implements and relations with fractal dimensions', **Soil and Tillage Research**, 197:104494, doi:10.1016/j.still.2019.104494.

Trangmar BB, Yost RS, Uehara G (1985) 'Application of Geostatistics to Spatial Studies of Soil Properties', in **Advances in Agronomy**, Elsevier, doi:10.1016/s0065-2113(08)60673-2.

Verbesselt J, Hyndman R, Zeileis A, Culvenor D (15 de dezembro de 2010) 'Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series', **Remote Sensing of Environment**, 114(12):2970–2980, doi:10.1016/j.rse.2010.08.003.

Victoria DDC, Bolfe E, Sano EE, Assad ED, Andrade RG, Guimarães DP, Landau E. C. (2020). Potencialidades para expansão e diversificação agrícola sustentável do Cerrado.

Waleed M, Mubeen M, Ahmad A, Habib-ur-Rahman M, Amin A, Farid HU, Hussain S, Ali M, Qaisrani SA, Nasim W, Javeed HM, Masood N, Aziz T, Mansour F, EL Sabagh A (1 de agosto de 2022) 'Evaluating the efficiency of coarser to finer resolution multispectral satellites in mapping paddy rice fields using GEE implementation', **Scientific Reports**, 12(1), doi:10.1038/s41598-022-17454-y.

Wardlow BD, Egbert SL. (2008). Large-Area Crop Mapping Using Time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the US Central Great Plains. *Remote sensing of environment*, 112(3), 1096-1116.

Weiss M, Jacob F, Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote sensing of environment*, 236, 111402.

Wheeler T, Von Braun J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6145), 508-513.

Wu L, Qin, Q, Liu X, Ren H, Wang J, Zheng X, Sun Y. (2016). Spatial up-scaling correction for leaf area index based on the fractal theory. *Remote Sensing*, 8(3), 197.

Xia Yong, Dagan Feng, Rongchun Zhao (março de 2006) 'Morphology-based multifractal estimation for texture segmentation', **IEEE Transactions on Image Processing**, 15(3):614–623, doi:10.1109/tip.2005.863029.

Xu T, Moore ID, Gallant JC (dezembro de 1993) 'Fractals, fractal dimensions and landscapes — a review', **Geomorphology**, 8(4):245–262, doi:10.1016/0169-555x(93)90022-t.

Xu Y, Yang Y, Chen X, Liu Y (2022) 'Bibliometric Analysis of Global NDVI Research Trends from 1985 to 2021', *Remote Sensing*, 14(16):3967, doi:10.3390/rs14163967.

Yamamoto JK, Landim PMB. (2013) *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: **Oficina de Textos**.

Zhang R, Tian J, Li Z, Su H, Chen S, Tang X (20 de março de 2010) 'Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products', **Science China Earth Sciences**, 53(5):741–751, doi:10.1007/s11430-010-0021-3.

Zhang R, Tian J, Li Z, Sun X, Jiang X (setembro de 2008) 'Spatial scaling and information fractal dimension of surface parameters used in quantitative remote sensing', **International Journal of Remote Sensing**, 29(17-18):5145–5159, doi:10.1080/01431160802036581.

Zhang Y, Sun H, Stowell HH, Zayernouri M, Hansen SE (setembro de 2017) 'A review of applications of fractional calculus in Earth system dynamics', **Chaos, Solitons & Fractals**, 102:29–46, doi:10.1016/j.chaos.2017.03.051.

Zhao X, Yang B, Yuan S, Shen Z, Feng D (22 de maio de 2022) 'Seepage–Fractal Model of Embankment Soil and Its Application', **Fractal and Fractional**, 6(5):277, doi:10.3390/fractalfract6050277.

Zhao Y, Liu J, Huang H, Zan F, Zhao P, Zhao J, Deng J, Wu C (28 de outubro de 2022) 'Genetic Improvement of Sugarcane (*Saccharum* spp.) Contributed to High Sucrose Content in China Based on an Analysis of Newly Developed Varieties', **Agriculture**, 12(11):1789, doi:10.3390/agriculture12111789.

Zhu L, Radeloff VC, Ives AR (junho de 2017) 'Improving the mapping of crop types in the Midwestern U.S. by fusing Landsat and MODIS satellite data', **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 58:1–11, doi:10.1016/j.jag.2017.01.012.

CAPITULO 2 - DINÂMICA TEMPORAL DA FERTILIDADE DO SOLO NA ÁREA DE CANA DE AÇÚCAR COM ÊNFASE NA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL

RESUMO: A expansão da área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), tem se intensificado sobre o bioma Cerrado e o estudo dos atributos químicos e físicos do solo associado a fertilidade ainda é incipiente. O objetivo do trabalho foi investigar por meio da análise fractal a dinâmica espaço-temporal dos atributos do solo associada à produção de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho distrófico na área de Cerrado. Para análise dos resultados fizemos o uso de estatística descritiva e da dimensão fractal. Os resultados mostram valores médios para CTC (Capacidade de Troca Catiônica) ($76,73 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e a acidez do solo (pH 4.5 – 6.8). O CV (Coeficiente de Variação) dos atributos variou entre médio K (Potássio) (56.49%) e baixo pH (potencial hidrogeniônico) (5.4%). Atributos como o K e o pH do solo apresentaram variabilidade ($D_F < 3$) ao longo do desenvolvimento da cultura. Mg (Magnésio) e MO (Matéria Orgânica) apresentaram valores de D_F (Dimensão Fractal) igual 3 ou maior 3 ao longo dos cortes realizados. Os atributos do solo estudados apresentaram dependência e variabilidade. O K foi o atributo que apresentou maior variabilidade, indicando $D_F < 3$ na área estudada. O nosso estudo mostra que o solo do Cerrado é heterogêneo e que a calagem para a correção da acidez do solo e as adubações para os próximos canaviais implantados deve considerar a variabilidade temporal do solo otimizando o aumento e a rentabilidade da fertilização e minimizando a variabilidade da fertilidade potencial.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura sustentável, Variabilidade, Mudanças temporais; Conservação; Manejo agrícola.

TEMPORAL DYNAMICS OF SOIL FERTILITY IN SUGARCANE AREA WITH EMPHASIS ON SUSTAINABLE PRODUCTION

ABSTRACT: The expansion of the area cultivated under sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), has intensified in the biome of Cerrado and the study of the chemical and physical attributes of the soil associated with fertility is still insufficient. The objective of this work was to investigate, through fractal analysis, the spatio-temporal dynamics of soil attributes associated with sugarcane production in a dystrophic Red Latosol in the Cerrado area. To analyze the results, we used descriptive statistics and the fractal dimension. The results show mean values for CEC (76,73 mmol_c dm⁻³) and high soil acidity (pH 4.5 – 6.8). The CV for attribute K was medium (56.49%) and low for pH (5.4%). Attributes such as K and soil pH varied ($D_F < 3$) throughout the growth of the crop. Mg and OM showed Fractal Dimension values equal to 3 or greater than 3 along the cuts performed. The soil attributes studied showed dependence and variability. Attribute K showed the highest variability, indicating $D_F < 3$ in the study area. Our study shows that the Cerrado soil is heterogeneous and that liming for correct soil acidity and fertilization for the next sugarcane plantations should consider temporal variability of the soil, optimizing the increase and profitability of fertilization and minimizing the variability of the potential fertility.

Keywords: Sustainable agriculture, Variability, Temporal changes; Conservation; Agricultural management.

2.1 Introdução

Garantir a fertilidade adequada do solo é o principal requisito da agricultura sustentável para alimentar as populações mundiais que estão em crescimento acelerado. (Chauhan e Kulshreshtha, 2021; Yang et al., 2020), assegurando a produção vegetal e animal, mantendo ou melhorando a qualidade da água e do ar e apoiando a saúde humana (Spaeth, 2020; Williams et al., 2020; Andrade et al., 2021). Portanto, estudar o solo requer um conhecimento da fertilidade, de modo a ser vista em função das características biológicas, físicas e químicas do solo, implicando no fornecimento de nutrientes para o crescimento e produtividade das plantas com o manejo adequado de cada cultura (Shrivastav et al., 2020; Ashour et al., 2021; Fierer et al., 2021).

O avanço da agricultura brasileira tem crescido principalmente nas áreas de Cerrado. A implantação de um novo sistema de produção agrícola sustentável a ser proposto nessas áreas requer novas formas de produção, que proporcionem aumento da produtividade nos sistemas de produção de alimentos, com boa qualidade e com melhor retorno financeiro para produtores, garantindo equilíbrio social, econômico e ecológico. (Ali e Mujeeb-Kazi, 2021; Ciesielczuk and Kirk 2022). No entanto, o solo do Cerrado apresenta baixa fertilidade natural (Mendonça et al., 2020; Alves de Andrade et al., 2021), e para um melhor desempenho necessita de um equilíbrio no fornecimento de nutrientes ao solo (Shukla et al., 2020).

A expansão do Cerrado se deu principalmente para o aumento de áreas de produção para a cana-de-açúcar, cultura mundial, muito cultivada em regiões tropicais e subtropicais (Baday, 2020; Neto et al., 2020; Yadav, 2020). O Brasil tornou-se o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, representando 39% da produção e 45% das exportações mundiais (USDA 2020, UNICA 2020; Silalertruksa and Gheewala 2020; Meghana and Shastri 2020). A região Centro-Sul do Brasil é responsável por cerca de 90% da produção de cana-de-açúcar e com a demanda de produção, faz-se necessária a adoção de um manejo eficaz para obter melhores resultados em áreas cultivadas com a cultura, mantendo a fertilidade do solo, bem como as características físicas e químicas adequadas para aumentar a qualidade do

produto. (El-Azeim et al., 2021; Palanni et al., 2021), tendo em vista que o manejo pode melhorar a produção e expressar diferentes padrões de variabilidade de atributos do solo nessas áreas, podendo até mesmo aumentar ao longo do tempo, uma vez que a dinâmica do solo pesa sobre a ação antrópica, que pode ser constantemente alterada, influenciando os atributos do solo.

Sabendo que a variabilidade do solo é resultado da interação de propriedades físicas, químicas e biológicas que atuam sobre o solo em diferentes intensidades e escalas, a estatística clássica por si só não seria capaz de explicar a interação que ocorre, pois ela considera que os elementos que constituem um espaço são independentes. Portanto, a Geometria Fractal seria capaz de fornecer uma descrição mais abrangente e atual para o estudo do solo, sendo capaz de quantificar e prever sua dinâmica em uma variedade de escalas. (Meakin, 1991).

A teoria dos fractais é um método de descrição de sistemas com escalas não características e autossimilaridade, foi primeiramente sugerida e estabelecida por Mandelbrot (1977). Na ciência do solo, a geometria fractal tem sido utilizada para avaliar o pH do solo, o teor de carbono orgânico, nitrogênio, fósforo e potássio disponível, a relação entre o tamanho de partículas e a formação de distribuição de agregados (Deng et al., 2017; Zou et al., 2021; Saiedi et al., 2017; Keshavarzi et al, 2018; Chari et al, 2020).

Portanto, sabendo da necessidade de racionalizar o uso de fertilizantes nas áreas de produção, pesquisas têm sido realizadas para analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo, a fim de melhorar o uso de recursos nessas áreas, utilizando geoestatísticas que identificam se há ou não dependência espacial dentro de um intervalo de amostragem entre as observações realizadas, levando em consideração as informações pontuais no solo. Utilizando a análise fractal como ferramenta para facilitar a tomada de decisão e a adoção de medidas de manejo adequadas para melhorar a qualidade do solo, podemos utilizar a dinâmica dos atributos estudados e identificar essa alteração de atributo devido à ação antrópica.

Assim, o uso de fertilizantes, a adoção de práticas de manejo eficientes e tecnologias como a agricultura de precisão (Sanches et al., 2021; Roberts et al, 2021; Gardezi and Stock, 2021) pode transformar as regiões de Cerrado que foram palco de uma expansão da agricultura em áreas que considere a gestão das

atividades socioeconômicas de sustentabilidade e desenvolvimento humano, com foco em uma proposta de agricultura tropical sustentável (Dick et al., 2021; Jacob et al., 2021).

Sabendo que um dos desafios para a agricultura é conciliar a demanda por alimentos com práticas mais sustentáveis, há uma necessidade de melhorar as práticas agrícolas, aprimorando a eficiência de utilização de nutrientes, minimizando o desperdício de alimentos e aperfeiçoando a produção. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi investigar as variações espaciais e temporais dos nutrientes do solo em áreas de cana-de-açúcar no bioma Cerrado utilizando análises fractais para o desenvolvimento da agricultura tropical sustentável.

2.2 Materiais e Métodos

A área de estudo localiza-se no município de Itumbiara-GO (Figura 3), com população aproximada de 104.742 habitantes em uma área com extensão de 2.462,9 km² (IBGE, 2019) e localiza-se a uma altitude média de 443 metros acima do nível do mar, 18° 25' 18" Latitude Sul e 49° 12' 56" Longitude Oeste.

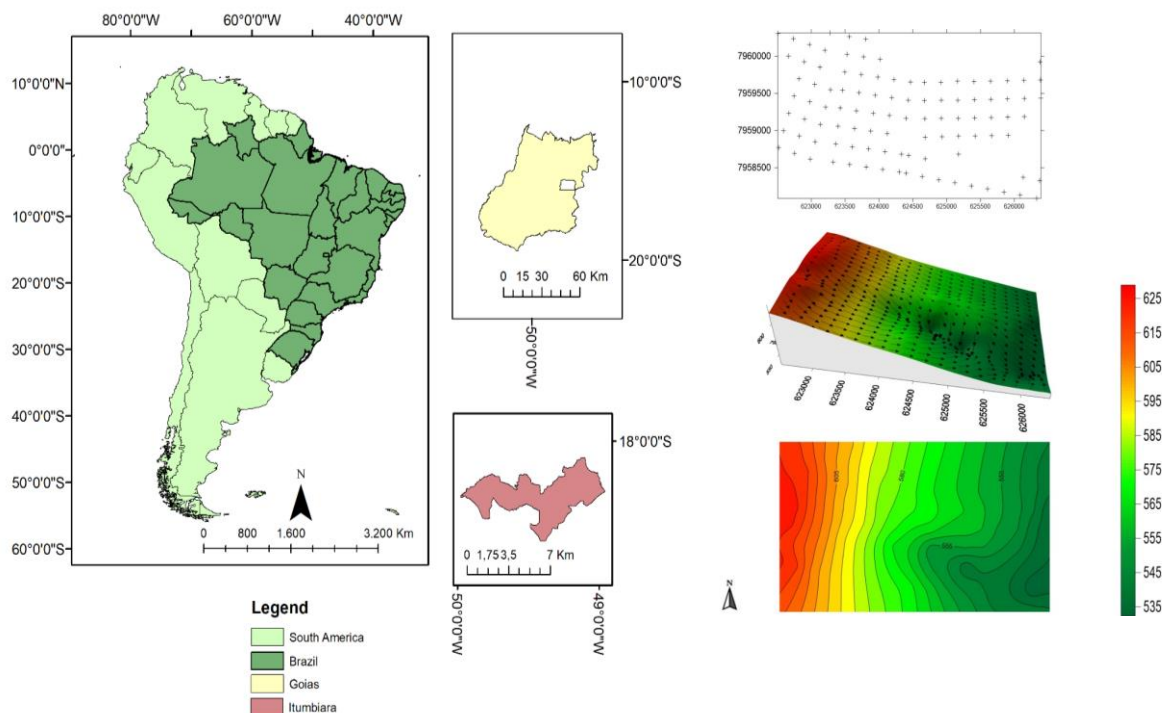


Figura 3. Localização geográfica da área de estudo com os pontos amostrais e descrições gerais do terreno.

A temperatura média em Itumbiara é de cerca de 25.0 °C, com taxas médias anuais de precipitação de 1123 mm. A região apresenta tipo de solo: Latossolo Vermelho distrófico, distroférico, argiloso vermelho e cambissolo háplico. A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do rio Paraná, pertencente à região hidrográfica do Paraná. Os principais rios são o Paranaíba, Bois e Meia-Ponte.

2.2.1 Instalação e Condução do Experimento

O estudo foi conduzido em área de 630,23 ha, classificada como Latossolo Vermelho distrófico. A cultura plantada na área foi cana-de-açúcar, cultivar SP81-3250. As operações de subsolagem foram realizadas antes do plantio, em gradagem intensiva com incorporação de calcário dolomítico e gesso.

Antes do plantio foram realizadas aplicações de ureia $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, fosfato monoamônio (MAP) e cloreto de potássio (KCl). O Nitrato de amônio (NH_4NO_3) e cloreto de potássio (KCl) foram utilizados anualmente na área. Os micronutrientes foram aplicados nas folhas durante os meses de outubro e novembro. A cultura foi cultivada de janeiro a fevereiro, sendo a planta de cana-de-açúcar (primeiro corte) colhida em até 18 meses, com seguimento da safra anterior.

2.2.3 Determinação dos atributos do Solo

As amostras de solo foram coletadas para caracterização química da área, de acordo com a metodologia descrita pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997). As amostras foram coletadas nas quatro glebas utilizando-se o método mais simples e direto de coleta de amostras superficiais, utilizando um trado de solo.

A determinação do pH do solo foi realizada em solução normal de cloreto de potássio, de acordo com a metodologia adotada pelo Instituto Agrônomo. A amostra foi transferida para o cilindro plástico e adicionada da solução em KCl 1 N. Logo após, começou a mexer por 15 minutos e esperou os 30 minutos para que o líquido se tornasse sobrenadante para realizar a leitura.

2.2.4 Análise Fractal dos Resultados

A estrutura espacial das superfícies fractais podem ser descrita pela seguinte relação de lei de potência: (Miranda, 2000):

$$|z(x) - z(x+h)| \propto h^H, \quad (2)$$

em que z corresponde ao valor do atributo estudado, x representa a localização espacial, h é a distância de separação e H é a *codimensão fractal ou expoente de Hölder* (Huang and Bradford, 1992). If $0 < H \leq 1$, A codimensão fractal é definida como (Palmer, 1988):

$$H = d - D_F, \quad (3)$$

onde D_F é a dimensão fractal, d é a dimensão euclidiana do sistema no qual a distribuição fractal foi descrita, ou seja, $d = 1, 2$ e 3 para linhas, superfícies e volumes, respectivamente. Assim, a dimensão fractal de um atributo do solo é dada por $DF = 3 - H$ (Miranda, 2000). Assim, ao compararmos as Equações (1) e (2), podemos dizer que os dados ao apresentarem um comportamento fractal em uma dada escala, apresentam a seguinte proporção (Palmer, 1988):

$$\hat{\gamma}(h) \propto h^{2H} \quad (4a)$$

ou, de outra forma:

$$\log[\hat{\gamma}(h)] \propto 2H \log[h] \quad (4b)$$

De acordo com a equação (4b), a inclinação do variograma experimental na escala logarítmica é igual a $2H$. Portanto, o expoente H foi obtido pela análise de regressão linear no gráfico dessa equação (Perfect e Kay, 1995):

$$H = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\log[\hat{\gamma}(h)]}{2\log[h]} \quad (5)$$

O valor de DF é igual a 3 quando $H = 0$, o que representa a ausência de uma estrutura de variabilidade espacial (efeito pepita puro), pois não haveria relação entre a forma como o atributo varia no espaço em função de h , indicando a ausência de dimensão fractal. Entretanto, quando $0 < H < 3$, a dimensão fractal assume valores que caracterizam a presença de uma estrutura de variabilidade espacial e a dependência do atributo com h (Palmer, 1988).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Variabilidade Espaço-temporal dos atributos estudados

Os dados foram primeiramente analisados por meio de estatística descritiva, o que pode ser observado na Tabela 2 (média, erro padrão médio, desvio padrão, mínimo, máximo, coeficiente de variação, assimetria e curtose). A classificação da CTC pôde ser observada na Tabela 1. Como a CTC é uma importante característica química das terras cultivadas, nossos resultados indicaram valores médios para a CTC ($76,73 \text{ mmolc dm}^{-3}$), a CTC pode ter influenciado a estabilidade do solo, a disponibilidade de nutrientes, o pH do solo, bem como pode ter reagido com a adubação do solo (Bath et al., 2019).

Table 1. Tabela de padrões de classificação da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo

Classification standars of soil CEC		
CEC - pH 7,0		
Classification	cmolc/dm ³	mmolc/dm ³
Low	< 5,5	< 55
Average	5,6 – 15,0	56 – 150
High	15,1 a 50,0	151 a 500
Very High	>50,1	>501

A variação dos atributos do solo pode ser classificada pelo seu coeficiente de variação. (CV), um indicador importante para a compreensão da natureza da variação. Ressalta-se que grande parte desses atributos é afetada pelo manejo do solo. Warrick e Nielsen (1980), considerando baixos os valores de CV <12%, médios para 12%< CV<60% e altos para CV>60% área.

As variáveis Ca (48,37%), CTC (19,33%), K (56,49%), Mg (39,28%) e MO (13,48%) foram classificadas como médias. Por outro lado, o pH do solo foi classificado como baixo (5,4%). Essa heterogeneidade nos valores de CV pode ter várias causas, como o acúmulo e a distribuição das partículas do solo devido ao relevo e ao fluxo de água, além da falta de homogeneidade durante o manejo químico com aplicação de corretivo de solo (Moitinho et al., 2021).

Table 2. Estatística descritiva das variáveis na área cultivada com cana-de-açúcar.

GLEBA 01								
	Média	Med.	E. P	D. P	Curt.	Ass.	Mín. - Máx.	CV%
Ca	32,01	31,00	0,91	13,42	9,65	2,05	12-120	41,94
CTC	79,05	79,00	0,92	13,54	3,31	1,13	52-148	17,12
K	1,11	1,00	0,05	0,66	37,85	4,74	0,4-7,4	59,69
Mg	10,20	10,00	0,23	3,41	0,30	0,75	5-21	33,38
MO	31,53	32,00	0,28	4,10	-0,37	0,30	25-42	13,02
pH	5,28	5,20	0,02	0,26	6,22	1,73	4,9-6,8	4,98
GLEBA 02								
Ca	27,65	26,50	0,71	13,73	6,30	1,57	7-120	49,63
CTC	75,77	75,00	0,80	15,48	2,68	0,27	5,3-148	20,43
K	1,06	1,00	0,03	0,60	32,64	3,96	0,2-7,4	56,97
Mg	9,33	9,00	0,20	3,85	1,44	1,05	3-25	41,23
MO	30,20	30,00	0,21	4,11	0,05	0,27	21-42	13,61
pH	5,16	5,10	0,02	0,31	3,03	0,95	4,5-6,8	6,03
GLEBA 03								
Ca	27,57	27,00	0,61	13,12	6,15	1,46	7-120	47,59
CTC	75,85	76,00	0,69	14,99	2,36	0,23	5,3-148	19,77
K	1,01	0,90	0,03	0,57	35,46	4,06	0,2-7,4	55,97
Mg	9,46	9,00	0,17	3,67	1,35	0,94	3-25	38,86
MO	30,30	30,00	0,18	3,93	0,28	0,31	21-42	12,97
pH	5,18	5,20	0,01	0,29	3,24	0,88	4,5-6,8	5,66
GLEBA 04								
Ca	26,49	26,00	0,54	14,39	36,38	3,58	5-206	54,32
CTC	76,25	75,00	0,57	15,26	28,66	2,53	5,3-257	20,01
K	0,97	0,90	0,02	0,52	36,17	3,95	0,2-7,4	53,34
Mg	8,64	8,00	0,14	3,77	0,90	0,80	2-25	43,68
MO	31,91	32,00	0,17	4,57	-0,22	0,26	21-45	14,33
pH	5,14	5,10	0,01	0,29	2,64	0,79	4,5-6,8	5,58

Média; Mediana; E.P. Erro Padrão; D.P, Desvio Padrão; Curt, Curtose; Ass., Assimetria;

Min, Mínimo; Max, Máximo; CV, coeficiente de Variação (%).

A capacidade de troca catiônica indica que o solo, em seus atributos argila ou matéria orgânica, apresenta predomínio de cargas negativas na camada superficial. Como os opostos se atraem, cargas positivas se ligam a essas partículas, destacando cátions. Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} , sendo o magnésio (Mg 9,40 mmolc dm^{-3}), cálcio (Ca 28 mmolc dm^{-3}) e potássio (K 1,03 mmolc dm^{-3}), os três nutrientes mais importantes das plantas (Adnan et al., 2021; Bel et al., 2020).

Na Figura 4, do 1º ao 2º corte, não há pontos de $\text{DF} = 3$ ou $\text{DF} < 3$, o que indica ausência de estrutura de variabilidade, com exceção da CTC. Porém, já no 3º corte, o atributo K começa a mudar ($\text{DF} > 3$ para $\text{DF} < 3$) e apresenta dependência ($\text{DF} < 3$). Mostrando que algumas variáveis como CTC, Ca e Mg são menos modificadas ($\text{DF} > 3$) que K, que desde então tem sido a variável que tem mostrado maior dependência ao longo dos anos de gestão analisados. A CTC apresentou-se ($\text{DF} < 3$) apenas em 1º e 2º, especificamente nos ângulos de 150° e 300° respectivamente, mostrando-se estruturada ($\text{DF} = 3$ ou $\text{DF} > 3$) nos demais cortes. O Ca mostrou-se dependente ($\text{DF} < 3$) apenas no 6º e 7º corte, também no mesmo ângulo de dependência (60 e 240°).

A partir do 3º corte, nos ângulos de 60°, 120° e 150°, K passou a apresentar alta variabilidade ($\text{DF} < 3$). Sendo igualmente predominante no 4º e 5º corte. Por outro lado, o Mg não apresentou dependência fractal ($\text{DF} < 3$) ao longo dos cortes realizados. Exceto por uma pequena variabilidade ($\text{DF} < 3$) próxima a 0 e ângulo de 180° observada no 5º corte.

Sabendo-se que o solo mantém mais fortemente cátions polivalentes, dando preferência à troca catiônica ($\text{K}^{+} < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$), a concentração de cada cátion na solução do solo poderia influenciar a ordem de preferência, uma vez que a solução é diluída, com menos cátions por volume de água no solo. A variação na disponibilidade de nutrientes a cada ano pode ser a resposta à fertilidade devido ao manejo adotado na área de cana-de-açúcar. Dependendo do manejo utilizado, podem ocorrer efeitos benéficos na disponibilidade de K^{+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} (Leal et al., 2013; Vuyyuru et al., 2020).

Outro fator que pode explicar a variabilidade desses macronutrientes seria a natureza de solos tropicais com CTC essencialmente variável, pois o intemperismo

químico em solos tropicais causa depleção de componentes solúveis, resultando em condições pobres em nutrientes com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e aumenta o Al tóxico para as plantas na solução do solo (Nieuwenhuysen et al., 2000; Ryan e Huertas, 2009; Singh et al., 2017; Van Ranst et al., 2017).

Na Figura 5, temos outros dois fatores que interferem na CTC do solo, o pH e a MO, com valores médios de 5,19 mmolc dm⁻³ e 30,98 g kg⁻¹ respectivamente. A MO, embora apresente pequena variabilidade (DF<3) no 2º corte no ângulo de 30°, onde no mesmo ano, tanto a CTC quanto o pH apresentaram a mesma variabilidade (DF<3) sob o mesmo ângulo. Das três, MO foi a variável que apresentou maior estabilidade ao longo dos anos (DF=3 ou DF>3), sem estrutura de alta variabilidade (DF<3) ao longo do desenvolvimento da cultura. Assim, pode-se inferir que a cultura utiliza o nutriente aplicado ao solo e que esse atributo tem permanecido na área, padrão geralmente observado em canaviais no Brasil.

O pH apresentou maior dependência espacial (D_F<3) no 1º e 2º corte nos mesmos ângulos de 0° a 30°, o que equivale aos dois primeiros manejos para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. A dose de nitrato de amônio aplicada a cada ciclo subsequente na superfície do solo pode explicar essa dependência do período inicial. O solo é naturalmente ácido (pH 4,5 - 6,8) devido à questão de origem na intensidade do intemperismo, tendo estabilidade durante a estação de crescimento da cultura ao longo dos cortes decorrente do fato de seu CV ter sido classificado como baixo (5,4 %).

Figura 4. Dimensão fractal (DF) nas direções dos atributos do solo cultivado com cana-de-açúcar. (CTC, Ca, K, Mg).

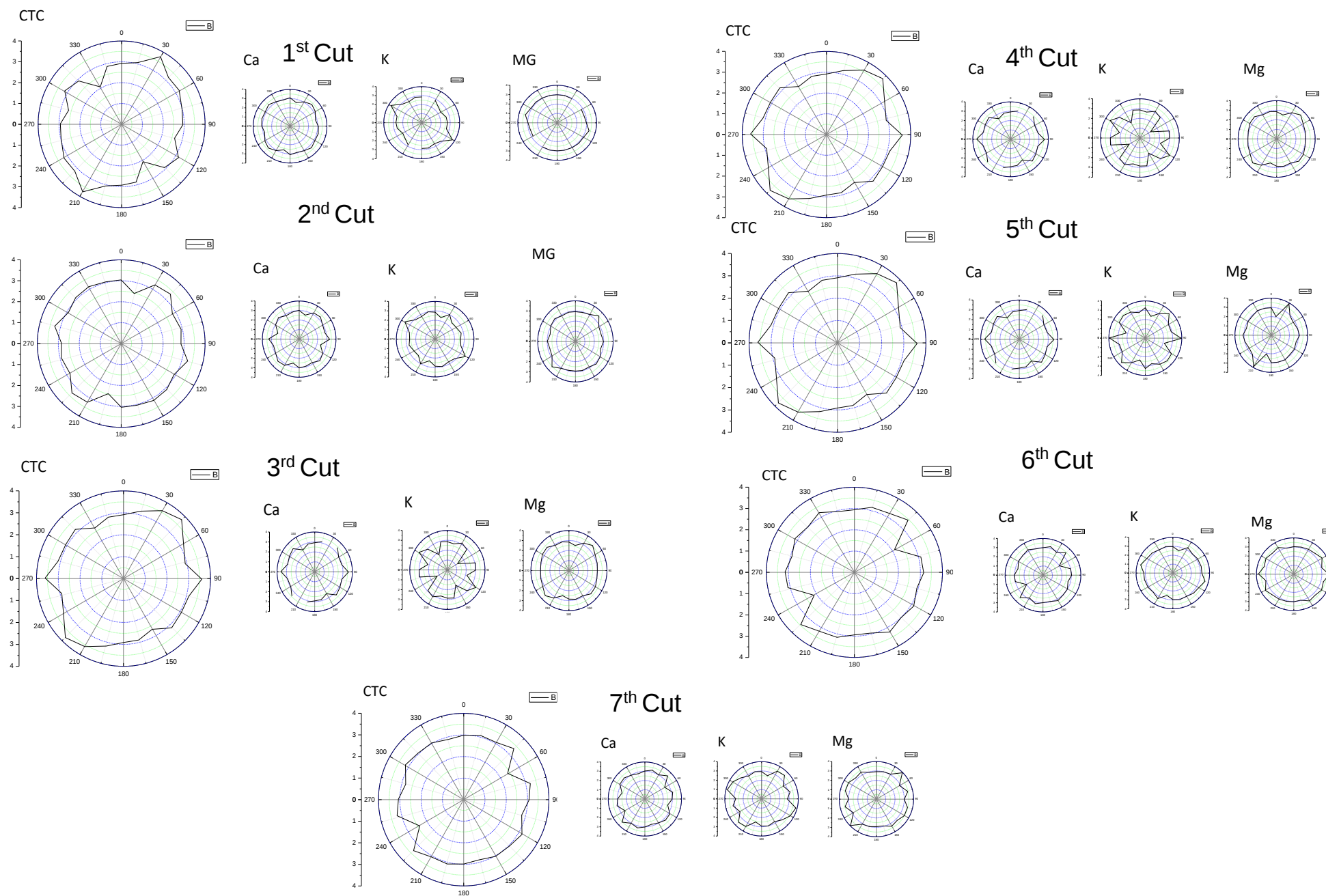
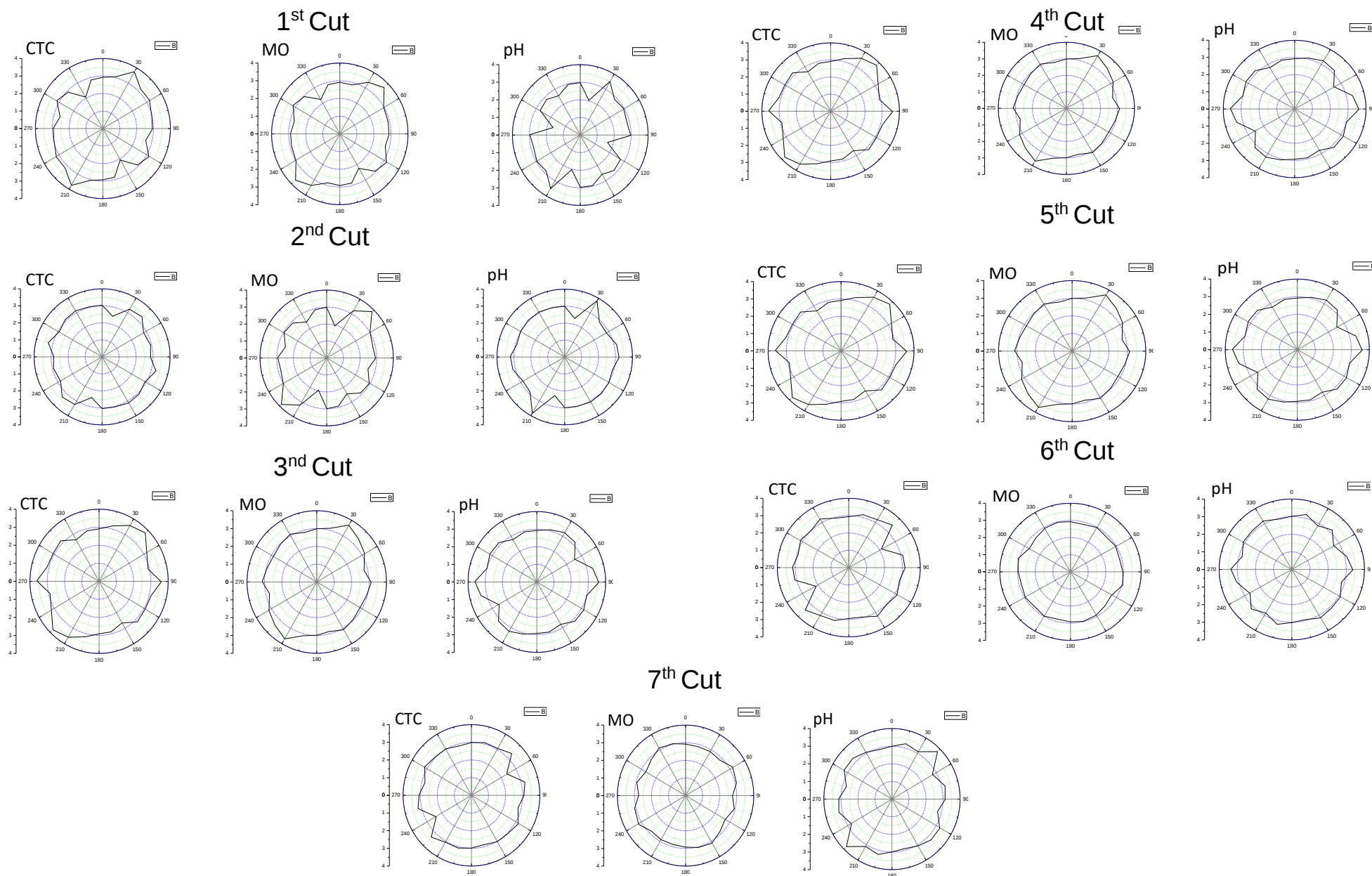


Figure 5. Dimensão fractal (DF) em diferentes direções dos atributos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. (CTC, MO, pH)



O uso de fertilizantes tem aumentado nos últimos anos para melhorar a produção agrícola, particularmente em países em desenvolvimento, como o Brasil. Neste estudo, foram avaliados atributos como CTC, Ca, K, Mg, MO e pH em solo cultivado sob cultivo de cana-de-açúcar. Sabe-se que técnicas de plantio e alteração das características do solo por meio da calagem e adubação podem proporcionar maior produtividade (Santos et al., 2020).

Ao contrário da percepção adotada para o manejo da aplicação na área durante os anos de estudo, verificou-se que a prática de adubação do solo após a colheita não foi efetiva ao longo dos anos. pode ser representada pela heterogeneidade dos valores de CV, associada ao acúmulo e distribuição de partículas de solo devido à forma do terreno e ao fluxo de água, também pela falta de homogeneidade durante o manejo químico com aplicação de corretivo de solo (Moitinho et al., 2021).

Normalmente, o pH do solo é um parâmetro considerado estável. No entanto, a variabilidade (pH) moderada a baixa pode ser atribuída aos processos pedogênicos, e a variabilidade nos atributos do solo pode ser atribuída ao efeito combinado do tipo de solo, condições climáticas e práticas de manejo do solo para o cultivo.

Em termos de fractalidade, geralmente é observada mais fortemente em troca de atributos complexos e sua variabilidade pode ser afetada por adubação, aditivos orgânicos, calagem, práticas de preparo do solo, entre outros. (Vidal-Vázquez et al., 2013).

A variabilidade do K pode ter sido consequência da disponibilidade de nutrientes como Ca e Mg. K sendo o macronutriente que apresentou maior dependência ($DF < 3$), sendo o Mg a variável que se mostrou mais padronizada para cada ciclo. O solo de cerrado tem baixo potencial de carga, que em combinação com fontes solúveis de potássio como o KCl pode levar a perdas por lixiviação. O potássio na solução do solo faz o movimento vertical e pode ser perdido através da lixiviação. A fonte de potássio utilizada também influencia a perda (Sanzonowicz e Mielniczuk, 1985; Yamada e Roberts 2005), pois sais de potássio de alta solubilidade aumentam o teor de potássio da solução do solo, favorecendo a lixiviação (Raij 2011).

Solos de cerrado são ácidos e pobres em nutrientes e pobres em cátions trocáveis, por exemplo, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} (Bustamante et al. 2012). Solos com teor de acidez (como o solo estudado) tendem a fornecer menos Mg e Ca devido à absorção menos eficiente desses íons. Normalmente, a fertilidade do solo e a disponibilidade de cálcio/magnésio dependem em grande parte das propriedades do solo e do manejo do campo. Como uma importante prática de manejo de campo, o fertilizante aumenta diretamente os nutrientes no solo para melhorar a fertilidade do solo (Cai et al., 2019; Zhang et al., 2021).

A aplicação de nitrato e amônio em cada ciclo da cana-de-açúcar pode ter acidificado o solo, mostrando que a dose de nitrato de amônio aplicada não foi ineficaz, o que contribuiu para a acidez do solo. Assim, de acordo com Sanches et al (2019), a produtividade da cana-de-açúcar é afetada pela variabilidade temporal do pH, tornando-se fator crítico para a saúde da cultura. Portanto, o pH deve ser analisado detalhadamente ao longo de cada ciclo da cultura, e não apenas uma vez na fase de plantio ou a cada 2 anos, como é mais comum no Brasil. A matéria orgânica, ao final do estudo está totalmente padronizada, outros estudos mostram que esta é uma característica em áreas de cana-de-açúcar.

O solo é o ecossistema que deve se equilibrar entre atributos físicos, químicos e biológicos, e o desafio da produção sustentável de alimentos é equilibrá-los. Entender a fertilidade e o processo de manejo, correção e adubação do solo é um dos fatores importantes para uma produção de alimentos mais eficiente e sustentável.

Para alcançar uma produção sustentável durante o desenvolvimento da cultura ao longo dos períodos de corte, o comportamento dos nutrientes essenciais deve ser observado. Na área, observou-se que a adubação e a correção não alcançaram a efetividade quantitativa adequada e equilibrada quanto à uniformidade, homogeneidade da terra cultivada, considerando-se principalmente elementos K.

Práticas de manejo equivalentes à ação antrópica para a implantação da cultura da cana-de-açúcar, como correção, adubação mineral e adubação orgânica da palha remanescente durante a colheita, devem ser realizadas de forma eficaz para a obtenção de um solo fértil e de alta produtividade, fornecendo nutrientes suficientes em proporções adequadas para serem absorvidos pelo sistema radicular.

No entanto, o desequilíbrio observado na superfície de desenvolvimento da cultura reflete a falta de nutrientes disponíveis.

Ao longo dos períodos de desenvolvimento da cultura, imediatamente após o corte, observa-se o fornecimento inadequado de CTC, nutrientes K, o que causa limitações no crescimento e produtividade das plantas. Portanto, o manejo de correção e adubação, para aumentar a efetividade do uso agrônômico do recurso do solo, deve ser um planejamento estrutural nos pontos-chave da cultura, para disponibilizar nutrientes de forma homogênea, otimizando o aumento e a rentabilidade da adubação e minimizando a variabilidade da fertilidade potencial.

2.4 Conclusão

Os atributos do solo estudados demonstraram dependência e variabilidade. O atributo K apresentou maior variabilidade na área de estudo e não absorveu efetivamente os nutrientes oferecidos à cultura da cana-de-açúcar. A calagem para correção da acidez do solo e adubação de canaviais subsequentemente implantados deve considerar a variabilidade temporal do solo. O uso da análise fractal possibilita a identificação de atributos homogêneos e heterogêneos, permitindo o ajuste do manejo da área.

Recomenda-se a construção de mapas de krigagem para melhor compreensão da variabilidade dos atributos do solo para fazer uso de doses adequadas de fertilizantes, proporcionando economia e eficiência da aplicação.

5 Referências

Adna M, Tampubolon K, Rehman FU, Saeed MS, Hayyat, MS, Imran, M, Tahir, R, Mehta J (2021). Influence of foliar application of Magnesium on Horticultural crops: A review. *AGRINULA: J, Agro. Perk.* 4(1), 13-21. DOI: <https://doi.org/10.36490/agri.v4i1.109>.

Ali N, Mujeeb-Kazi, A (2021). Food Production: Global Challenges to Mitigate Climate Change. In: Wani S.H., Mohan A., Singh G.P. (eds) *Physiological, Molecular,*

and Genetic Perspectives of Wheat Improvement. **Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59577-7_1.

Alves de Andrade C, Ramsdorf Gomes Patinni I, Andrea Pantaleão, Pereira Ribeiro Teodoro L, Naudi Silva Campos C, Pereira de Souza J, Eduardo Teodoro P (2021). Physiological response and earliness of soybean genotypes to soil base saturation conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 207(1), 163-169. <https://doi.org/10.1111/jac.12439>

Andrade VHGX, Redmile-Gordon M, Barbosa BHG, Andreote FD, Roesch, LFW, Pylro VS (2021). Artificially intelligent soil quality and health indices for 'next generation' food production systems. **Trends in Food Science & Technology**. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.018>

Ashour M, Hassan SM, Elshobary ME, Ammar GA, Gaber A, Alsanie WF, El-Shenody R (2021). Impact of commercial seaweed liquid extract (TAM®) biostimulant and its bioactive molecules on Growth and Antioxidant Activities of Hot Pepper (*Capsicum annuum*). **Plants**, 10(6), 1045. <https://doi.org/10.3390/plants10061045>

Baday SJ (2020). Sugarcane of Rapid Multiplication by Callogenesis. In **Journal of Physics: Conference Series** (Vol. 1660, No. 1, p. 012005) doi:10.1088/1742-6596/1660/1/012005

Baht MK, Labanya R, Joshi HC (2019). Influence of long-term chemical fertilizers and organic manures on soil fertility-A review. *Univers. J. Agric. Res*, 7(5), 177-188. DOI: 10.13189/ujar.2019.070502.

Bel J, Legout A, Saint André L, Hall S, Löfgren S, Laclau JP, Van der Heijden G (2020). Conventional analysis methods underestimate the plant-available pools of calcium, magnesium and potassium in forest soils. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72741-w>.

Bustamante M, Brito DQ, Kozovits AR, Luedemann, G, Mello TR, Siqueira Pinto A, Takahashi FS (2012). Effects of nutrient additions on plant biomass and diversity of the herbaceous-subshrub layer of a Brazilian savanna (Cerrado). **Plant Ecology**, 213(5), 795-808. <https://doi.org/10.1007/s11258-012-0042-4>

Cai A, Xu M, Wang B, Zhang W, Liang G, Hou E, Luo Y (2019). Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving

soil fertility. **Soil and Tillage Research**, 189, 168-175.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.022>.

Chari MM, Poozan MT, Afrasiab P (2020). Modelling soil water infiltration variability using scaling. **Biosystems Engineering**, 196, 56-66.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.014>

Chauhan S, Kulshreshtha S (2021). Application of Inorganic Amendments to Improve Soil Fertility. **Phytomicrobiome Interactions and Sustainable Agriculture**, 187-206. <https://doi.org/10.1002/9781119644798.ch10>.

Ciesielczuk J, Kirk E (2022). Sustainable Use of Marine Genetic Resources. In: Life Below Water. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. **Springer**. ISBN 978-3-319-98535-0. Full content URL:
<https://www.springer.com/gp/book/9783319985350>

Deng Y, Cai C, Xia, D, Ding S, Chen J (2017). Fractal features of soil particle size distribution under different land-use patterns in the alluvial fans of collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China. **Plos one**, 12(3), e0173555.

Dick M, Silva MA, Silva RRF, Ferreira OGL, Souza Maia M, Lima SF, Dewes H (2021). Environmental impacts of Brazilian beef cattle production in the Amazon, Cerrado, Pampa, and Pantanal biomes. **Journal of Cleaner Production**, 127750. doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127750.

El-Azeim A, Menesi AM, El-Mageed A (2021). Alluvial Soil Quality Indicators As Affected By Different Land-Uses. **Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering**. 267-277, 2021. 12(4), 267-277. [10.21608/jssae.2021.171527](https://doi.org/10.21608/jssae.2021.171527).

Fierer N, Wood SA, Mesquita CPB (2021). How microbes can, and cannot, be used to assess soil health. **Soil Biology and Biochemistry**, 153, 108111. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108111>.

Gardezi M, Stock R (2021). Growing algorithmic governmentality: Interrogating the social construction of trust in precision agriculture. **Journal of Rural Studies**, 84, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.03.004>.

Huang C, Bradford JM (1992). Applications of a laser scanner to quantify soil

microtopography. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.14-21.

Jacob MCM, Chaves VM, Rocha C (2021). Biodiversity Towards Sustainable Food Systems: Four Arguments. In: Jacob M.C.M., Albuquerque U.P. (eds) Local Food Plants of Brazil. **Ethnobiology. Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69139-4_1.

Keshavarzi A, Tuffour HO, Bagherzadeh A., Duraisamy VASU (2018). Spatial and fractal characterization of soil properties across soil depth in an agricultural field, Northeast Iran. **Eurasian Journal of Soil Science**, 7(2), 93-102. <https://doi.org/10.18393/ejss.339032>.

Leal MRL, Galdos MV, Scarpore FV, Seabra JE, Walter A, Oliveira CO (2013). Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. **Biomass and Bioenergy**, 53, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.007>

Mandelbrot BB, Fisher AJ, Calvet LE (1997). A multifractal model of asset returns.

Meakin P (1991). Fractal aggregates in geophysics. **Reviews of Geophysics**, 29(3), 317-354.

Meghana M, Shastri Y (2020). Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges. **Bioresource Technology**, 303, 122929.

Mendonça AM, Lira JMS, Oliveira Vilela AL, Vieira DA, Melo NC, Barbosa JPRAD (2020). High aluminum concentration and initial establishment of *Handroanthus impetiginosus*: clues about an Al non-resistant species in Brazilian Cerrado. **Journal of Forestry Research**, 31(6), 2075-2082., [10.1007/s11676-019-01033-5](https://doi.org/10.1007/s11676-019-01033-5).

Miranda JGV (2000). Análisis fractal del microrrelieve del suelo (Doctoral dissertation, 600 Universidade da Coruña).

Moitinho MR, Teixeira DDB, Silva Bicalho E, Panosso AR, Ferraud AS, Pereira GT, La Scala J N (2021). Soil CO₂ emission and soil attributes associated with the microbiota of a sugarcane area in southern Brazil. **Scientific Reports**, 11(1), 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87479-2>.

Neto AR, Chagas EA, Costa BN., Chagas PC, Vendrame WA (2020). Photomixotrophic growth response of sugarcane in vitro plantlets using different light intensities and culture vessel types. In **Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant**, 56(4), 504-514. <https://doi.org/10.1007/s11627-020-10057-0>

Nieuwenhuysen A, Verburg PSJ, Jongmans AG (2000). Mineralogy of a soil chronosequence on andesitic lava in humid tropical Costa Rica. **Geoderma**, 98 (2000), pp. 61-82 [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00052-5).

Obi AO (1989). Long-term effects of the continuous cultivation of a tropical ultisol in southwestern Nigeria. **Experimental Agriculture**, London, v.25, n.2, p.207-215.

Palani K, Selvam SPP, Velusamy S, Melmangalam RR (2021). Soil Fertility Evaluation to Adopt Climate-Smart Agriculture in Mambattu Village, Maduranthakam Block of Kanchipuram District, Tamil Nadu, India. **Nature Environment and Pollution Technology**, 20(2), 595-600. Original Research Paper <https://doi.org/10.46488/NEPT.2021.v20i02.016>.

Palmer M. W (1988). Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. **Vegetatio**, 75(1-2), 91-102. <http://doi.org/10.1007/BF00044631>.

Perfect E, Kay BD (1995). Applications of fractals in soil and tillage research: a review. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 36, n.1-2, p.1-20.

Raij BV, 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: **Instituto Agronômico de Campinas**.

Roberts D, Short NM, Sill J, Lakshman DK, Hu X, Buser M (2021). Precision agriculture and geospatial techniques for sustainable disease control. **Indian Phytopathology**, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42360-021-00334-2>.

Ryan PC, Huertas F (2009). The temporal evolution of pedogenic Fe–smectite to Fe–kaolin via interstratified kaolin–smectite in a moist tropical soil chronosequence. **Geoderma**, 151 (2009), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.010>.

Saiedi N, Besalatpour AA, Shirani H, Abbaszadeh Dehaji P, Esfandiarpour I, Faramarzi M (2017). Aggregation and fractal dimension of aggregates formed in sand dunes stabilized by *P. istachio* PAM and *P. istachio* PVA c mulches. **European**

Journal of Soil Science, 68(5), 783-791. <https://doi.org/10.1111/ejss.12458>

Sanches GM, Magalhães PS, Kolln OT, Otto R, Rodrigues JrF, Cardoso TF, Franco HC (2021). Agronomic, economic, and environmental assessment of site-specific fertilizer management of Brazilian sugarcane fields. **Geoderma Regional**, 24, e00360. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00360>

Sanches GM, Paula MTND, Magalhães PSG, Duft DG, Vitti AC, Kolln OT, Franco HCJ (2019). Precision production environments for sugarcane fields. **Scientia Agricola**, 76, 10-17. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0128>

Santos JFS, Naval LP (2020). Spatial and temporal dynamics of water footprint for soybean production in areas of recent agricultural expansion of the Brazilian savannah (Cerrado). **Journal of Cleaner Production**, 251, 119482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119482>

Sanzonowickz C, Mielniczuk J (1985). Distribuição do potássio no perfil de um solo, influenciado pela planta, fonte e métodos de aplicação de adubos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v.9 p. 45-50.

Shrivastav P, Prasad M, Singh TB, Yadav A, Goyal D, Ali A, Dantu PK (2020). Role of nutrients in plant growth and development. **In Contaminants in agriculture** (pp. 43-59). Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_2.

Shukla SK, Sharma L, Jaiswal VP, Pathak AD, Tiwari R, Awasthi SK, Gaur A. (2020). Soil quality parameters vis-a-vis growth and yield attributes of sugarcane as influenced by integration of microbial consortium with NPK fertilizers. **Scientific Reports**, 10(1), 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75829-5>.

Silalertruksa T, Gheewala SH, (2020). Competitive use of sugarcane for food, fuel, and biochemical through the environmental and economic factors. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 25(7), 1343-1355.

Singh R, Dhaliwal MK (2017). Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: a review. **Environ. Sustain. Indic.**, 1–2, Article 100007, [10.1016/j.indic.2019.100007](https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007)

Souza LC, Procópio L (2021). The profile of the soil microbiota in the Cerrado is

influenced by land use. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11377-w>

Spaeth Jr, KE (2020). Taming the Land: A Historical Perspective. In: Soil Health on the Farm, Ranch, and in the Garden. **Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40398-0_1.

Van Ranst NP, Qafoku A, Noble RK, Xu (2017). Solos de carga variável: mineralogia e química. **Environ. Exp. Bot.**, 137, pp. 177-193 <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.005>.

Vidal-Vázquez E, Camargo OD, 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). <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0188>.

Vuyyuru M, Sandhu HS, Erickson JE, Ogram AV (2020). Soil chemical and biological fertility, microbial community structure and dynamics in successive and fallow sugarcane planting systems. **Agroecol. Sustain. Food Syst**, 44(6), 768-794. [10.1080/21683565.2019.1666075](https://doi.org/10.1080/21683565.2019.1666075)

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

Williams MI, Farr CL, Page-Dumroese DS, Connolly SJ, Padley E (2020). Soil Management and Restoration. In: Pouyat R., Page-Dumroese D., Patel-Weynand T., Geiser L. (eds) Forest and Rangeland Soils of the United States Under Changing Conditions. **Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45216-2_8.

Yadav S, Jackson P, Wei X, Ross EM, Aitken K, Deomano E, Voss-Fels KP (2020). Accelerating genetic gain in sugarcane breeding using genomic selection. **Agronomy**, 10(4), 585. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040585>

Yamada T, Roberts TL (2005). Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Associação Brasileira da Potassa e do Fosfato. p.612-658.

Yang T, Siddique KH, Liu K (2020). Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. **Global Ecology and Conservation**. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01118>.

Zhang Y, Shengzhe E, Wang Y, Su S, Bai L, Wu C, Zeng X (2021). Long-term manure application enhances the stability of aggregates and aggregate-associated carbon by regulating soil physicochemical characteristics. **CATENA**, 203, 105342. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105342>.

Zou X, Zhang Z, Wu M, Wan Y (2021). Slope-scale spatial variability of fractal dimension of soil particle size distribution at multiple depths. **Soil Science Society of America Journal**, 85(1), 117-131. <https://doi.org/10.1002/saj2.20178>

CAPÍTULO 3 – DIMENSÃO FRACTAL DA REFLECTÂNCIA DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL

RESUMO: Com a necessidade de obter altos índices de produtividade e de reduzir gastos, a agricultura brasileira tem adotado tecnologias, como a agricultura de precisão. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a variabilidade do espectral da reflectância da cultura da cana-de-açúcar pelo índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) por meio da análise fractal. O trabalho foi realizado no município de ITUMBIARA-GO. Para se obter os dados do índice de vegetação (NDVI) utilizamos o sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Após a mensuração da reflectância da cultura, foram calculados os índices de vegetação NDVI. Os valores de reflectância variou ao longo do tempo com mínimos de 0.292 e máximos 0.675, no 6º e no 1º corte, respectivamente. As médias foram 0.607, 0.546 e 0.586, 1º, 2º e 3º corte, que indicou que a cana-de-açúcar manteve seu vigor, apresentando uma tendência a queda a partir do 4º corte. O NDVI apresentou $DF = 3$ ou $DF > 3$ no 1º, 2º e 3º corte, nos mesmos ângulos estudados o de 120º e 300º. Do 4º ao 6º corte o NDVI se manteve padronizado. No 7º ano, a anisotropia ocorreu nos ângulos de 120º e 300º, mesmos ângulos observados nos cortes iniciais. A declividade e a linha de plantio influenciaram a reflectância cana-de-açúcar. O sistema indicador anisotrópico foi importante para compreender o sistema de manejo e obter e sistema de agricultura de precisão.

Palavras chaves: Anisotropia; Sensoriamento Remoto; Reflectância; Variabilidade.

FRACTAL DIMENSION OF THE REFLECTANCE OF SUGARCANE CULTIVAR IN CENTRAL BRAZIL

ASBTRACT: Brazilian agriculture has adopted technologies, such as precision agriculture, to obtain high productivity rates and reduce costs. Through fractal analysis, this work aims to evaluate spectral variability of the reflectance of the sugarcane crop by normalized difference vegetation index (NDVI). The work was carried out in the municipality of ITUMBIARA-GO. To calculate the vegetation index (NDVI) we used the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor. After measuring crop reflectance, NDVI vegetation indices were calculated. Reflectance values varied over time, with minimums of 0.292 and maximums of 0.675, in the 6th and 1st cuts, respectively. The averages were 0.607, 0.546, and 0.586, in the 1st, 2nd, and 3rd cut, which indicated that the sugarcane maintained its vigor, showing a downward trend from the 4th cut. The NDVI presented $DF = 3$ or $DF > 3$ in the 1st, 2nd, and 3rd cut, in the same studied angles, 120° and 300°. From the 4th to the 6th cut, the NDVI remained standardized. In the 7th year, anisotropy occurred at angles of 120° and 300°, the same angles observed in the initial cuts. Slope and planting lines influenced sugarcane reflectance. The anisotropic indicator system was important to understand the management system and obtain the precision agriculture system.

Keywords: Anisotropy; Remote sensing; Reflectance; Variability.

3.1 Introdução

A agricultura é um dos principais impulsionadores da economia brasileira (Kato; Leite, 2020). O país conta com uma grande área cultivável e com clima que favorece várias culturas (Junior et al., 2022), principalmente a da cana de açúcar, um dos motivos que faz do Brasil o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. O setor sucroalcooleiro é um dos segmentos mais importantes do agronegócio no país. De acordo com a CONAB a safra de 2021/22 registrou um total de 585,2 milhões de

toneladas. O Centro-Oeste se destaca como a principal região de expansão do agronegócio brasileiro e é a segunda maior produtora de cana-de-açúcar 131,3 milhões de toneladas colhidas (CONAB, 2021).

Para manter elevadas produções é necessário aumentar a produtividade nas lavouras (Erenstein et al., 2022; Kumar et al., 2019; Nascimento et al., 2022). O que evidencia a necessidade de meios mais eficientes para redução de despesas e aumento da eficiência das culturas (Anas et al., 2022; Silva et al., 2021). Nesse sentido, a agricultura de precisão (AP) oferece potenciais benéficos como boas práticas de cultivo, otimização de recurso e mitigação de efeitos no ambiente (Oliveira et al., 2020; Queiroz et al., 2022; Raj et al., 2022).

A diferença entre o gerenciamento convencional de áreas e da agricultura de precisão é a integração de tecnologias modernas na coleta, processamento e análise dos dados espaciais e temporais (Pontes e Cavichioli, 2019; Luchiari et al., 2000), que busca detectar, monitorar e manejar a variabilidade nos sistemas de produção (Reghini, 2020). A aplicação da geoestatística na agricultura de precisão tem por objetivo caracterizar a variabilidade (Araújo et al., 2019; Pusch et al., 2022), que é comumente realizada a partir de análises laboratoriais de amostras georreferenciadas, onde é possível medir parâmetros químicos e parâmetros físicos obtidos a partir de sensores de campo.

Quanto à variabilidade espacial da cultura, dispomos de mapas de produtividade e o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, foi proposto por Rouse et al. (1973), e é considerado um dos principais indicadores para a análise da cobertura vegetal. O índice utiliza as faixas visível e infravermelha próxima do espectro eletromagnético para monitorar e quantificar a densidade da vegetação em uma determinada área (Galvêncio, 2019). O monitoramento de cultura é capaz de fornecer uma gama de informações desde estimativa de rendimento a melhores formas de desenvolvimento sustentável (Boori et al., 2019; Santos Luciano, et al., 2021; Daraneesrisuk et al., 2023). Estudo realizado por Antunes et al (2015), mostrou o uso de sensor para estudar variabilidade tem um grande potencial do monitoramento temporal que identifica padrões fenológicos na cultura da cana-de-açúcar, pois a biomassa verde do dossel é analisada pelo NDVI e índices similares

dentro de um pixel por satélite, a partir da utilização de refletâncias visíveis e do infravermelho (Guan et al., 2016; Krupavathi et al., 2021), o que permite identificar grande parte da variabilidade de uma área de cultivo agrícola (Liakos et al., 2015; Molin et al., 2015; Pantazi et al., 2016).

Embora o Brasil desempenhe um importante papel no cenário agrícola, a agricultura de precisão brasileira ainda está em uma fase muito iniciante., necessitando de estudos que possam ir além da relação entre índices obtidos de imagens de sensores remotos e variáveis climáticas, como temperatura e precipitação. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar a variabilidade do espectral da reflectância da cultura da cana-de-açúcar pelo índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) por meio da análise fractal.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo fica no município de Itumbiara-GO (Figura 1). localizada no sul do estado de Goiás, na microrregião geográfica da Meia Ponte situada, por sua vez, na mesorregião geográfica do Sul Goiano. O clima na região é do tipo Aw determinado como tropical úmido (KÖPPEN, 2013). A precipitação de chuvas média anual é de 1.830 mm, com temperatura média de 25°C.

3.2.1 Instalação do Experimento

A área de estudo foi de 630,23 ha, com Latossolo Vermelho Distrófico. A cultura implantada foi a cana-de-açúcar, na cultivar SP81-3250. Dividida em 4 gleba.

Antes do plantio, foram realizadas as aplicações de uréia $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio (KCl). E uso anual de Nitrato de amônio (NH_4NO_3) e cloreto de potássio (KCl) eram usados anualmente na área. Durante o plantio foram realizadas as operações de subsolagem e gradagem intensiva com incorporação de calcário dolomítico e gesso. Os micronutrientes fornecidos a planta

durante os meses de outubro e novembro. A safra foi de ano-meio, sendo a cana planta (primeiro corte) colhido em 18 meses.

3.2.2 Coleta e amostragem do NDVI na área estudada

Cada ponto foi georreferenciado no programa Google Earth Pro, e posteriormente inseridos na plataforma digital do SatVeg de onde foi coletado os dados das séries temporais de 2008 a 2019. Para se calcular o índice de vegetação (NDVI) utilizamos o sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), que opera em 36 canais espectrais, apresentando resolução espacial que varia de 250 a 1.000 metros. Utilizamos a plataforma Terra e Aqua, com imagens disponibilizadas em resolução espacial de aproximadamente 250m.

3.2.3 Análises estatísticas e Fractal dos dados coletados

Os dados foram analisados, por meio da estatística descritiva e a estrutura espacial das superfícies fractais foi descrita pela seguinte relação de lei de potência (Miranda, 2000)

$$|z(x) - z(x+h)| \propto h^H$$

Se $0 < H \leq 1$ a codimensão fractal é definida como (PALMER, 1988):

$$H = d - D_F$$

Onde D_F é a dimensão fractal, e d é a dimensão Euclidiana do sistema, dentro do qual a distribuição fractal é apresentada, ou seja, valores iguais a 1, 2 e 3 para linhas, áreas e volumes, respectivamente. Assim, para uma propriedade distribuída no solo, sua dimensão fractal será representada como $DF = 3 - H$ (Vivas-Miranda, 2000).

Se $H=0$, $DF = 3$, 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).

3.3 Resultados e Discussão

A temperatura média em Itumbiara-GO foi de aproximadamente 24 °C durante o período de estudo, apresentando maiores temperaturas médias no período que compreende o 5º e 7º corte da cultura (24,8°C). As menores temperaturas médias foram observadas no período compreendido entre o 2º e 4º corte (23,6 °C). Durante o estudo, a precipitação total da área foi de 10442 mm, com maiores índices pluviométricos no período equivalente ao 7º corte da cultura (2231,4 mm). Já os menores índices se concentraram no período do 1º e no 6º corte, apresentando precipitação de 1021 e 1215 mm respectivamente (Figura 6).

Para a cultura da cana-de-açúcar, a necessidade hídrica é em média 1000 mm, quando bem distribuídas (Sobrinho et al, 2019; Santos, 2021), o que favorece elevadas produções, sem a necessidade de instalar irrigação. Considerando o estudo realizado, pode-se afirmar que ao longo de todos os cortes, a cultura da cana-de-açúcar recebeu água o suficiente para seu desenvolvimento. De acordo com Coelho et al., (2018) e Arcoverde et al., (2019), a disponibilidade de água promove um melhor aproveitamento da radiação solar e realização da fotossíntese.

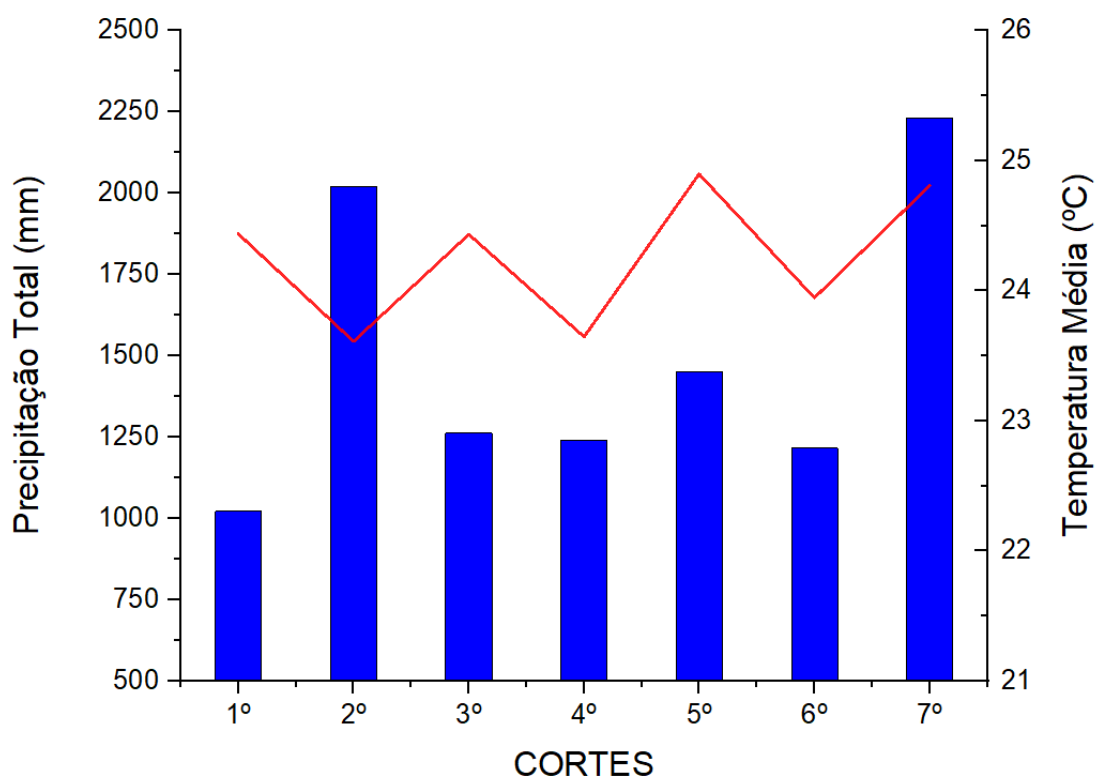


Figura 6. Precipitação e temperatura da área de estudo ao longo dos cortes realizados.

Os valores de reflectância da superfície da cana-de-açúcar ao longo dos ciclos produtivos estão apresentados na Tabela 3. Os valores demonstraram que a radiação que é refletida pela superfície da cana-de-açúcar varia ao longo do tempo, sendo os valores mínimos (0.292) e máximos (0.675) de NDVI que ocorreram no 6º e no 1º corte, respectivamente.

Com os valores de médias 0.607, 0.546 e 0.586, 1º, 2º e 3º corte, respectivamente, percebemos que a cana-de-açúcar mantém seu vigor, começando uma tendência de queda a partir do 4º corte. No 7º corte foi observado o menor valor médio do índice NDVI (0.541), que mostrou uma tendência crescente desde o 1º corte, indicando que a vegetação na área de estudo melhorou gradualmente. Fato pode estar associado à poucas folhas na fase inicial de desenvolvimento da cultura e consequentemente maior exposição do solo.

Tabela 3. Estatística descritiva do NDVI ao longo dos cortes observados.

	Média	Med.	E. P	D. P	Curt.	Ass.	Mín. - Máx.	CV%
1º Corte								
NDVI	0.607	0.611	0.003	0.032	17.190	-2.811	0.399 - 0.675	5.27
2º Corte								
NDVI	0.546	0.526	0.006	0.058	-0.734	0.079	0.369 - 0.640	10.60
3º Corte								
NDVI	0.586	0.578	0.003	0.031	7.805	-1.319	0.418 - 0.645	5.25
4º Corte								
NDVI	0.578	0.559	0.005	0.049	1.067	-0.157	0.380 - 0.664	8.56
5º Corte								
NDVI	0.563	0.578	0.005	0.053	1.622	-0.922	0.343 - 0.660	9.40
6º Corte								
NDVI	0.556	0.553	0.005	0.050	6.487	-1.327	0.292 - 0.655	8.96
7º Corte								
NDVI	0.541	0.541	0.004	0.041	6.644	-1.036	0.330 - 0.658	7.53

Média; Mediana; E.P. Erro Padrão; D.P, Desvio Padrão; Curt, Curtose; Ass., Assimetria; Min, Mínimo; Max, Máximo; CV, coeficiente de Variação (%).

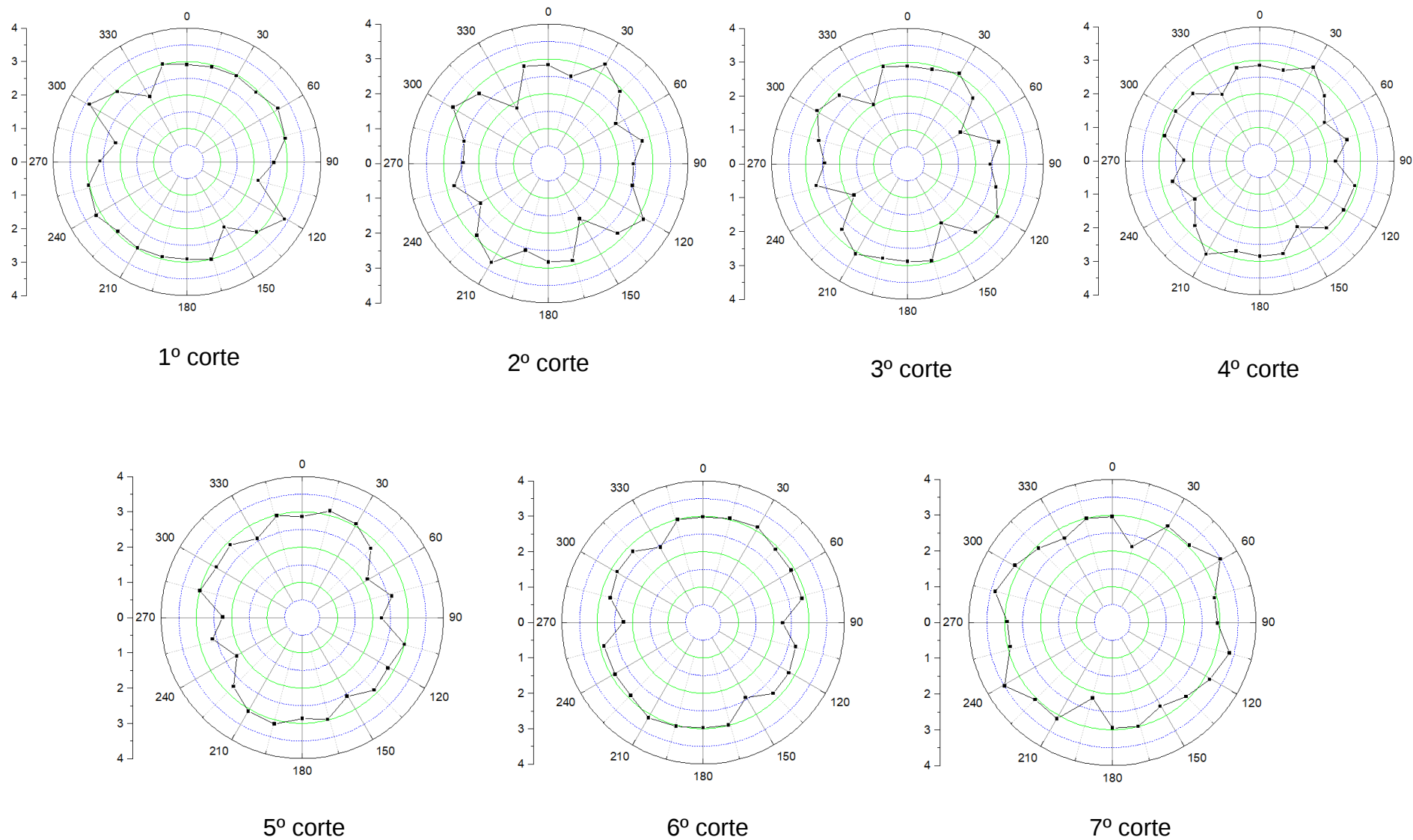
O maior coeficiente de variação (CV) foi encontrado no 2º corte (10.60 %). O CV permite a comparação de resultados de diferentes experimentos, envolvendo uma mesma variável ou espécie, permitindo, assim, quantificar a precisão das pesquisas. Tendo como referência a classificação do CV de Warrick & Nielsen (1980), para a classificação da variabilidade dos atributos analisados, o CV foi classificado como baixo em todos os cortes realizados.

3.3.1 Variabilidade Espaço-temporal dos atributos estudados

Na Figura 7, no gráfico correspondente ao 1º corte, o NDVI se mostrou padronizado com a presença anisotrópica no ângulo de 120º e 300º (DF = 3 ou DF >3), coincidindo com o período de menor precipitação. De acordo com Sobrinho et al, 2019 e Silva et al., 2020, as primeiras fases vegetativas da cultura da cana-de-açúcar são facilmente influenciadas pela disponibilidade de água o que prejudica o crescimento da cultura e o aumento do índice foliar.

De acordo com Vidal-Vázquez; Vivas-Miranda; Paz-Gonzalez, (2005) e Vidal-Vázquez et al. (2010), a dimensão fractal é um ótimo fator para a caracterização da anisotropia, uma vez que se mostra sensível a elementos externos como cobertura vegetal, o relevo, chuva e ações antrópicas.

Figura 7. Gráfico de rosas do NDVI ao longo dos cortes observados, na direção de 0° a 330° em área de cana-de-açúcar.



Segundo Latorre et al 2003, a reflectância da superfície terrestre é altamente anisotrópica. Quando observado do espaço o valor depende de duas variáveis: o ângulo observação o ângulo da iluminação solar. Essa resposta se dá pela transferência radiativa no interior de dosséis, pela estrutura tridimensional da vegetação ou por outras superfícies.

No 2º corte, temos a presença de estrutura de variabilidade do NDVI com dependência espacial nos ângulos de 60°, 150° e 330° ($DF < 3$). Semelhante ao segundo corte, no 3º ciclo produtivo da cana-de-açúcar, o NDVI mostrou-se dependente ($DF < 3$) nos mesmos ângulos (60°, 150° e 330°). Embora não se tenha observado a presença de anisotropia no 2º e 3º, observou que ocorreu uma leve tendência anisotrópica ($DF = 3$ ou $DF > 3$) nos mesmos ângulos do 1º corte. Estudo realizado por Kimes (1983), identificou que ao longo dos anos de estudo pode ocorrer anisotropia de refletância de superfície no NDVI, onde ocorre o aumento do efeito à medida que aumenta o ângulo. Embora a tendência anisotrópica tenha sido observada, esta ocorre sempre no mesmo ângulo de estudo 120° e 300°.

A partir do 4º corte a tendência anisotrópica observada nos cortes anteriores se mostrou padronizada, caracterizando a estrutura de variabilidade ($DF < 3$) nos ângulos de 120° e 300°. Seguindo o mesmo padrão, o 5º e o 6º corte se mostrou dependente $DF < 3$. Estudo realizado por Zanzarini et al, (2013), encontrou para o índice de vegetação NDVI, uma dependência instalada em todas as datas analisadas, dependência que pode ser impulsionada principalmente pelo clima regional, chuva e temperatura, sendo uma relação estabelecida com escalas espaciais e temporais (Fabricante et al., 2009). Segundo Rodrigues et al, (2019), essa variabilidade encontrada em áreas de produção deve ser considerada no manejo da cultura. Tendo em vista essa dependência do NDVI Ricotta et al, (1998), sugere estudar os ciclos fenológicos da cultura em condições de estresse para avaliar melhor o grau de dependência da biomassa e confirmar essa dependência.

O 7º corte apresentou estrutura de variabilidade expressiva nos ângulos de 30 e 180°, acontecendo no mesmo período de maiores índices pluviométricos durante os anos de estudo, o que nos permite afirmar que mesmo com disponibilidade de chuvas (2249 mm) e boa temperatura (25°C) para cultura no ciclo produtivo, o 7º corte foi onde o NDVI apresentou menores valores de reflectância

(0.541). Danner et al., 2017, descobriram que os efeitos anisotrópicos do ângulo de visão do sensor na refletância são fortes nos estágios iniciais da cultura. Dessa forma, percebemos que o maior padrão anisotrópico foi observado no 1º corte, que se refere a cana planta, nesse caso não são provenientes da rebrota.

O NDVI apresentou anisotropia ao longo dos anos, mostrou uma tendência de aumento e redução ao longo do tempo. No entanto, ao longo dos cortes, ele foi pouco afetado por efeitos direcionais (ângulos). O mesmo resultado foi observado por Breunig et al, (2012), ao estudar a variação da refletância da vegetação pelo sensor MODIS.

A anisotropia ocorreu quando as propriedades da refletância da superfície da cobertura vegetal da área eram relativas ao período do 1º, 2º, 3º e 7º corte. Dessa forma, podemos afirmar que a anisotropia se manifestou de acordo com as linhas de plantio nas vertentes da bacia e em determinadas condições de luz e posições das plantas de cana-de-açúcar. A anisotropia ocorre nas linhas de plantio indicando que estas possuem diferenças significativas de fertilidade e manejo em cada talhão, decorrência da declividade do terreno (figura 8), entre outros.

3.4 Conclusão

O NDVI apresentou $DF = 3$ ou $DF > 3$ no 1º corte nos ângulos de 120° e 300° , no 7º corte a anisotropia ocorreu em ângulos próximos (90° e 270°).

A cana-de-açúcar perdeu vigor a partir do 4º corte da cultura ao longo dos cortes realizados, sendo dependente $DF < 3$ também no 5º e 6º.

A dependência observada pode ser a resposta das chuvas e temperatura adequadas durante cada ciclo da cultura. Em relação a anisotropia, podemos afirmar que esta ocorreu nas linhas de plantio e pode ajudar na compreensão do sistema de manejo para obter a melhoria da área de produção. O NDVI é uma ferramenta do sensoriamento remoto e um indicador de acompanhamento importante para a lavoura de cana-de-açúcar, podendo ser usado para indicar manejos mais específicos para a área estudada.

3.5 Referências

Alvares CA, Stape JL Sentelhas PC, Gonçalves JL, de M, Sparovek G, Köppen's Climate Classification Map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. 2013. Acesso em: 19/01/2023.

Antunes JF, Lamparelli RA e Rodrigues LH (2015) 'Avaliação da dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de perfis temporais de dados MODIS', **Engenharia Agrícola**, 35(6):1127–1136, doi:10.1590/1809-4430-eng.agric.v35n6p1127-1136/2015.

Arcoverde SN, De Souza CM, Orlando RC, Da Silva MM e Do Nascimento JM (2019) Crescimento Inicial De Cultivares De Cana-De-Açúcar Em Plantio De Inverno Sob Preparos Conservacionistas Do Solo, **REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA - REVENG**, 27(2):142–156, doi:10.13083/reveng.v27i2.803.

Boori MS, Choudhary K, Paringer R, Sharma AK, Kupriyanov A e Corgne S (18–20 de setembro de 2019) 'Monitoring Crop Phenology Using NDVI Time Series from Sentinel 2 Satellite Data' [apresentação na conferência], 2019 **5th International Conference on Frontiers of Signal Processing** (ICFSP), Marseille, France, doi:10.1109/icfsp48124.2019.8938078.

Breunig FM, Galvão LS, Formaggio AR e Epiphanyo JC (5 de abril de 2012) 'Variation of MODIS reflectance and vegetation indices with viewing geometry and soybean development', **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 84(2):263–274, doi:10.1590/s0001-37652012005000018.

Coelho AP, Dalri AB, Faria RT, Landell PA, Palaretti LF (2018) Perfilamento da cana-de-açúcar cultivada com e sem irrigação suplementar e plantada por mudas pré-brotadas: Um novo conceito. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.7, n.4, p.71-84.

Danner M, Berger K, Woher M, Mauser W, Hank T (2017) Retrieval of biophysical crop variables from multi-angular canopy spectroscopy. **Remote Sensing**.

Daraneesrisuk J, Ninsawat S, Losiri C e Sitthi A (2022) 'Sugarcane and Cassava Classification Using Machine Learning Approach Based on Multi-temporal Remote Sensing Data Analysis', in **Springer Geography**, Springer International Publishing, doi:10.1007/978-3-031-16217-6_14.

Erenstein O, Jaleta M, Sonder K, Mottaleb K e Prasanna BM (2022) 'Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications', **Food Security**, doi:10.1007/s12571-022-01288-7.

Fabricante I, Oesterheld M, Paruelo J M (2009). Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 73(8), 745-753.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations—FAOSTat, Land Use Data 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>>

Guan K, Wu J, Kimball JS, Anderson MC, Frolking S, Li B, Hain CR e Lobell DB (2017) 'The shared and unique values of optical, fluorescence, thermal and microwave satellite data for estimating large-scale crop yields', **Remote Sensing of Environment**, 199:333–349, doi:10.1016/j.rse.2017.06.043.

Junior WS, De Oliveira Silva, JA, De Oliveira SA, De Queiroz Paiva J, De Santana J. F, Cavalcante LVT (2022) Viabilidade Econômica De Nove Variedades De Cana-De-Açúcar Em Ciclo De Ressoca Cultivadas No Brejo Paraibano. **Meio Ambiente (Brasil)**, 4(4).

Kimes DS (1983) Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. **Applied Optics**, 22, 1364–1372.

Krupavathi K, Raghubabu M, Mani A, Parasad PRK, Edukondalu L. (2021) Field-scale estimation and comparison of the sugarcane yield from remote sensing data: A machine learning approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. Disponível em <<https://doi.org/10.1007/s12524-021-01448-w>>

Kumar A, Patel JS, Meena VS, Srivastava, R (2019) Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 20, 101271.

Latorre ML, Anderson LO, Shimabukuro YE, Carvalho Júnior, AO (2003) Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. **Revista Espaço e Geografia**, 91-121.

Li J, Lewis J, Rowland J, Tappan G, Tieszen LL (2004) 'Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series', **Journal of**

Arid Environments, 59(3):463–480, doi:10.1016/j.jaridenv.2004.03.019.

Liakos V, Tagarakis A, Fountas S, Nanos GD, Tsiropoulos Z, Gemtos T (2015) 'Use of NDVI to predict yield variability in a commercial apple orchard', in **Precision agriculture '15**, Wageningen Academic Publishers, doi:10.3920/978-90-8686-814-8_69.

Nascimento Freire DD, Cavichioli FA (2022) 'INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (ILPF)', **Revista Interface Tecnológica**, 19(2):680–690, doi:10.31510/infa.v19i2.1482.

Nobre Cunha G, Pasqualetto A (21 de novembro de 2022) 'ANÁLISE DA EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM GOIÁS/ANALYSIS OF SUGARCANE EXPANSION IN GOIÁS', **Informe GEPEC**, 26(3):120–143, doi:10.48075/igepec.v26i3.29741.

Oliveira AJ, Silva GF, Silva GR, Santos AA, Caldeira DS, Vilarinho MK, Barelli MA, Oliveira TC (2020) 'POTENCIALIDADES DA UTILIZAÇÃO DE DRONES NA AGRICULTURA DE PRECISÃO / DRONES POTENTIALITY USE IN PRECISION AGRICULTURE', **Brazilian Journal of Development**, 6(9):64140–64149, doi:10.34117/bjdv6n9-010.

Pontes LB, Cavichioli FA (2019) Agricultura de precisão.

Pusch M, Samuel-Rosa A, Oliveira AL, Magalhães OS, Amaral LR (21 de março de 2022) 'Improving soil property maps for precision agriculture in the presence of outliers using covariates', **Precision Agriculture**, doi:10.1007/s11119-022-09898-z.

Queiroz DM, Valente DSM, De Carvalho Pinto FDA, Borém A. (2022) (Eds.). **Agricultura digital**. Oficina de Textos.

Raj EFI, Appadurai M, Athiappan K (2022) Precision farming in modern agriculture. In Smart Agriculture Automation Using Advanced Technologies: Data Analytics and Machine Learning, Cloud Architecture, Automation and IoT Singapore: **Springer Singapore**. (pp. 61-87).

Reghini FL, Cavichioli FA (2020) Utilização de geoprocessamento na agricultura de precisão. **Revista Interface Tecnológica**, 17(1), 329-339.

Ricotta C, Avena GC, Olsen ER, Ramsey RD, Winn DS (1998). Monitoring the landscape stability of Mediterranean vegetation relation to fire with a fractal algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5), 871-881.

Santos Luciano AC, Picoli MC, Duft DG, Rocha JV, Leal MR, Maire G |(2021) 'Empirical model for forecasting sugarcane yield on a local scale in Brazil using Landsat imagery and random forest algorithm', **Computers and Electronics in Agriculture**, 184:106063, doi:10.1016/j.compag.2021.106063.

Santos JWF (2022) Eficiência e uniformidade de um sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cana-de-açúcar. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2021.

Silva GM, Périco AE (2022) 'Eficiência e sustentabilidade: uma análise econômica, social, ambiental e sustentável das usinas paulistas de cana-de-açúcar', **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 60(3), doi:10.1590/1806-9479.2021.238512.

Silva LL, Costa RF, Campos JHBC, Dantas RT (2009) Influence of Precipitations on Agricultural Productivity in Paraíba State. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 4, p. 454– 461.

Silva WK, Medeiros SE, da Silva LP, Coelho Junior LM, Abrahão R (26 de maio de 2020) 'Sugarcane production and climate trends in Paraíba state (Brazil)', **Environmental Monitoring and Assessment**, 192(6), doi:10.1007/s10661-020-08358-3.

Sobrinho OPL, Silva GS, Pereira ÁIS, Sousa AB, Castro WL, Santos, LNS (2019) Sugarcane cultivation (*saccharum officinarum*) and irrigation management. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**.

Zanzarini FV, Pissarra, TCT, Brandão, F J C, Teixeira DDB (2013) Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. Campina Grande, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* (17)6:608–614.

CAPÍTULO 4 - Considerações Finais

A tendência anisotrópica encontrada no NDVI ($DF = 3$ ou $DF > 3$) ao longo dos anos foi semelhante a observada na CTC e no K, o que nos permite relacionar os atributos do solo com o NDVI. A relação do NDVI de uma cultura e os atributos do solo podem ser afetadas por vários fatores, uma delas são as práticas de manejo adotadas. A análise fractal do NDVI gerado pelo sensor foi uma ferramenta que mostrou resultados bastante satisfatórios, apresentando relação positiva com o K e a CTC do solo.

No nosso estudo, o NDVI se mostrou como uma ferramenta da agricultura de precisão, que quando combinado outra ferramenta como a geoestatística, pode ser um indicador de acompanhamento ideal da lavoura de cana-de-açúcar, identificando a variabilidade da cultura, podendo ser utilizado na correção de manejos e em determinação de melhores de zonas para o monitoramento da produção.

Diante do trabalho, indicamos que na reforma do canavial deve-se posicionar as linhas de plantio em desnível suave, em direção ao talvegue da bacia hidrográfica, para assim, otimizar a produtividade da cana-de-açúcar, diminuir a variabilidade das áreas produtivas e minimizar possíveis danos ambientais. Com a grande quantidade de informações que temos caracterizada por ferramentas de imagens, se faz cada vez mais necessário o uso de geoestatísticas para minerar estas informações. Compreender o comportamento das áreas produtivas ao longo do tempo, permite a caracterização da sua dinâmica, com práticas voltadas para o melhoramento de gestão, fornecendo uma nova visão para avaliar o risco e diminuir os custos.