



THAINÁ GUIMARÃES ROCHA

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DE PLANTIOS DE
CAFÉ UTILIZANDO PARÂMETROS, BIOCLIMÁTICOS,
GEOMORFOMÉTRICOS E DADOS ESPECTRAIS**

**LAVRAS – MG
2022**

THAINÁ GUIMARÃES ROCHA

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DE PLANTIOS DE CAFÉ UTILIZANDO
PARÂMETROS BIOCLIMÁTICOS, GEOMORFOMÉTRICOS E DADOS
ESPECTRAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, linha de pesquisa em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Fausto Weimar Acerbi Júnior
Orientador

Kalill José Viana da Páscoa
Coorientador

**LAVRAS – MG
2022**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Rocha, Thainá Guimarães.

Modelagem da produtividade de plantios de café utilizando
parâmetros bioclimáticos, geomorfométricos e dados espectrais /
Thainá Guimarães Rocha. - 2022.

53 p.

Orientador(a): Fausto Weimar Acerbi Júnior.

Coorientador(a): Kalill José Viana da Pascoa.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Café. 2. Modelagem. 3. Campo das Vertentes. I. Acerbi
Júnior, Fausto Weimar. II. Pascoa, Kalill José Viana da. III. Título.

THAINÁ GUIMARÃES ROCHA

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DE PLANTIOS DE CAFÉ UTILIZANDO
PARÂMETROS BIOCLIMÁTICOS, GEOMORFOMÉTRICOS E DADOS
ESPECTRAIS**

**PRODUCTIVITY MODELING OF COFFEE PLANTS USING BIOCLIMATE,
GEOMORPHOMETRIC PARAMETERS AND SPECTRAL DATA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, linha de pesquisa em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de junho de 2022.

Dr. Fausto Weimar Acerbi Júnior UFLA

Kalill José Viana da Páscoa UFLA

Allan Arantes Pereria IFSULDEMINAS

Prof. Dr. Fausto Weimar Acerbi Júnior

Orientador

Kalill José Viana da Páscoa

Coorientador

LAVRAS – MG

2022

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me ajudou a superar os obstáculos, me dando forças para concluir essa dissertação de mestrado que tanto me ajudou a evoluir.

Aos meus pais Solange e Rocha, por todos os sacrifícios, suporte e amor incondicional que recebi não só nessa etapa, mas em toda minha vida.

Aos meus amigos que me acompanharam nessa jornada e me ajudaram a superar diversos obstáculos ao longo dos anos.

Ao professor Fausto, orientador, por todo apoio e ensinamentos ao longo dos anos.

Aos professores, amigos e colegas do LEMAF pelo conhecimento e companheirismo compartilhados.

À todos que, de alguma forma, direta ou indiretamente, proporcionaram condições para a realização desse trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Ciências Florestais, pela oportunidade de aprendizagem.

Muito Obrigada!

*“Hope is the thing with feathers
That perches in the soul,
And sings the tune without the words,
And never stops at all,*

*And sweetest in the gale is heard;
And sore must be the storm
That could abash the little bird
That kept so many warm.*

*I’ve heard it in the chillest land,
And on the strangest sea;
Yet, never, in extremity,
It asked a crumb of me.”*

Hope is the Thing With Feathers - Emily Dickinson

RESUMO GERAL

No Brasil, maior produtor de café no mundo, estima-se que a área destinada ao plantio de café seja de 2,16 milhões de hectares. A produtividade dessas áreas é capaz de suprir não só a demanda nacional, como também os mercados internacionais. Metade da produção brasileira está localizada em Minas Gerais, atividade essa que contribui para o desenvolvimento tecnológico, cultural e econômico do estado. Encontrar novas maneiras de determinar e caracterizar fatores que influenciam e ajudam a estimar a produtividade de plantios de café é uma necessidade que permite cada vez mais o crescimento da cultura. Sabendo que toda vegetação é influenciada pelo ambiente em que está inserida, e tendo em vista a quantidade de dados de fácil acesso disponíveis na atualidade, esse trabalho tem por objetivo: (1) determinar a correlação das variáveis bioclimáticas, espectrais e de terreno com a produtividade; (2) a partir do método de regressão, obter um modelo de produtividade que consiga representar a produtividade da região; (3) avaliar e compreender as variáveis apresentadas no modelo. Foram utilizados dados bioclimáticos provenientes de estações meteorológicas da região para obter as variáveis climáticas. Foram utilizados também dados espectrais derivados do satélite Sentinel – 2, de 10 metros de resolução espacial e variáveis geomorfométricas derivadas do Modelo Digital de Elevação SRTM, com resolução espacial de 30m. Para uma pré-seleção das variáveis, foi utilizada a correlação de Pearson. Com as variáveis pré-selecionadas, foi ajustado um modelo de regressão linear global. A partir do Bayesian information criterion, foram selecionados os 5 melhores modelos lineares, o modelo final foi aquele que apresentou os melhores valores para o coeficiente de determinação e o coeficiente de determinação ajustado ($R^2 = 0,71$ e $R^2_{ajus} = 0,54$). As variáveis que compuseram o modelo final foram: NDWIs; NDVIs; B3u; B2u; Profile Curvature; e Valley Depth. Os resultados encontrados em nosso estudo apesar de satisfatórios, demonstram a necessidade de continuidade dos estudos para melhor entendimento das relações do café com variáveis que possam influenciar na produtividade dos plantios.

PALAVRAS-CHAVES: Estimativa. Modelo de regressão linear. Campo das Vertentes.

GENERAL ABSTRACT

In Brazil, the largest coffee producer in the world, it is estimated that the area destined for coffee planting is 2.16 million hectares. The productivity of these areas is capable of supplying not only national demand, but also international markets. Half of the Brazilian production is located in Minas Gerais, an activity that contributes to the technological, cultural and economic development of the state. Finding new ways to determine and characterize factors that influence and help to estimate the productivity of coffee plantations is a necessity that increasingly allows for the growth of the culture. Knowing that all vegetation is influenced by the environment in which it is inserted, and in view of the amount of easily accessible data available today, this work aims to: (1) determine the correlation of bioclimatic, spectral and terrain variables with the productivity; (2) from the regression method, obtain a productivity model that can represent the productivity of the region; (3) evaluate and understand the variables presented in the model. Bioclimatic data from meteorological stations in the region were used to obtain the climatic variables. Spectral data derived from the Sentinel – 2 satellite, with 10 meters of spatial resolution and geomorphometric variables derived from the Digital Elevation Model SRTM, with a spatial resolution of 30m, were also used. For a pre-selection of variables, Pearson's correlation was used. With the pre-selected variables, a global linear regression model was fitted. Based on the Bayesian information criterion, the 5 best linear models were selected, the final model was the one that presented the best values for the coefficient of determination and the adjusted coefficient of determination ($R^2 = 0.71$ and $R^2_{adj} = 0.54$). The variables that composed the final model were: NDWIs; NDVIs; B3u; B2u; Profile Curvature; and Valley Depth. The results found in our study, despite being satisfactory, demonstrate the need to continue studies to better understand the relationship between coffee and variables that may influence the productivity of plantations.

KEYWORDS: Estimation. Linear regression model. Campo das Vertentes

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	8
1. INTRODUÇÃO	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 Café: Mundo, Brasil e Minas Gerais	10
2.2 Fatores que influenciam na cafeicultura	13
2.3 A importância do estudo produtividade	14
2.4 Uso do Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas na cafeicultura	16
3. CONSIDERAÇÕES GERAIS	20
REFERÊNCIAS	21
SEGUNDA PARTE - ARTIGO	26
Artigo 1 - Modelagem da produtividade de plantios de café utilizando parâmetros bioclimáticos, geomorfométricos e dados espectrais	26

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

O café é uma espécie nativa da Etiópia e foi introduzida no Brasil em 1727, contrabandeado da Guiana Francesa por Francisco de Mello Palheta (REICHMAN, 2018). Considerado uma *commodity*, seus principais produtos comercializados internacionalmente são o café em grão verde, arábica e robusta, e o café solúvel. Já no mercado nacional as variações do café moído, torrado e os cafés especiais são mais expressivas (Conselho dos Exportadores de Café do Brasil - 2015). Em muitos países, o café é um produto chave na economia nacional, sendo predominantemente cultivado em pequenas propriedades, gerando empregos e renda para milhões de famílias rurais (VEGRO; DE ALMEIDA, 2019).

Desde sua introdução no país, o Brasil sempre esteve em destaque produtivo da bebida, se tornando desde muito cedo, um dos maiores produtores e consumidor para o café. Atualmente, o Brasil se encontra na posição de o maior produtor de café no mundo, com uma área de cultivo de aproximadamente 2,16 milhões de hectares (CONAB, 2020), e se encontra em segundo lugar no mercado consumidor da bebida. Mesmo já ocupando essa posição de destaque, de acordo com o Conselho de Exportadores de Café do Brasil, o país mostra evolução e crescimento na cafeicultura, registrando em 2020 um recorde de exportação com 44,6 milhões de sacas. Esse crescimento é, em parte, decorrente do grande investimento em inovações tecnológicas e incentivos em pesquisas na área, processos essenciais não só para o crescimento quantitativo, mas também qualitativo da bebida, suprimindo inclusive a crescente demanda do mercado consumidor por cafés de melhor qualidade, denominados cafés especiais, que são obtidos a partir de modificações e variações nas técnicas de cultivos (PIRES et al., 2003; GUIMARÃES et al., 2016).

Para incentivar os produtores, também foi criado um programa de certificação de origem e da qualidade do café, denominado Programa Cafés do Brasil, que traz reconhecimento para as especificidades de cultivo para cada região produtora. Em Minas Gerais, maior estado produtor de café no país e mundialmente conhecido pelos seus cafés especiais, várias regiões buscaram o registro de Indicação Geográfica, para que houvesse a valorização das qualidades únicas do produto, a tradição e territorialidade, e também para gerar uma segurança para o mercado consumidor, atribuindo procedência em suas bebidas. Atualmente, o estado já apresenta 3 regiões com Indicação Geográfica, são elas: Cerrado Mineiro, Serra da Mantiqueira de Minas e Campo das Vertentes (BARONE, 2017; GUIMARÃES; 2016).

Considerando a importância econômica e cultural que a bebida carrega, e a crescente demanda do café no mercado global, o estudo da produtividade dos plantios beneficia o setor cafeeiro fornecendo mais informações que auxiliam na tomada de decisão dos produtores, no planejamento e manejo da cultura, otimizando e impulsionando ainda mais o setor. Atualmente no Brasil, as estimativas de produtividade das safras são realizadas pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) através de um monitoramento das áreas produtivas, baseado em um mapeamento dos plantios, na dinâmica do uso do solo e em estudo climatológicos (CONAB, 2020).

Assim como o crescimento de diversas culturas é influenciado por fatores climáticos, principalmente temperatura e precipitação, o crescimento de café também é sensível a esses fatores, o qual necessita de condições específicas para o seu cultivo e, quando essas condições não ocorrem, a produtividade e qualidade da bebida podem ser prejudicadas, causando por exemplo, abortamento de flores, atraso no desenvolvimento de frutos, entre outros. Além de fatores climáticos, a fertilidade, propriedades físicas e químicas, topografia, também estão relacionadas com a capacidade produtiva e de crescimento do café, havendo inclusive evidências que a altitude é responsável pela variação da qualidade, sendo os melhores grãos produzidos em regiões de maior altitude (RAMOS ALVES et al., 2011).

Com tantos fatores influenciando a cafeicultura, a geociência vem sendo inserida em estudos sobre plantios de café, permitindo o uso de Sistemas de Informações Geográficas para facilitar a manipulação e visualização desses inúmeros fatores existentes. Além disso, a inclusão do Sensoriamento Remoto permite melhores resultados na caracterização dos plantios através de mapeamentos, classificações de imagens, identificação de estresses bióticos e abióticos, estimativas quantitativas como estoque de carbono e produtividade, entre outros.

Considerando a importância que a cafeicultura carrega, não só num viés econômico, mas também cultural e histórico, dar continuidades nos estudos e buscar melhores metodologias aplicáveis para impulsionar a cafeicultura é necessário. À vista disso, este trabalho tem por finalidade contribuir para o setor cafeeiro, buscando determinar uma metodologia para estimativa de produtividade em escala regional. Além disso, os resultados contribuirão para o conhecimento da região cafeeira Campo das Vertentes, localizada no sul de Minas Gerais, que vem recebendo cada vez mais destaque na produção de cafés especiais no mercado nacional e internacional.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Café: Mundo, Brasil e Minas Gerais

O café tem como origem a Etiópia, país do continente africano. Não estabelecido com precisão quando e quem descobriu a espécie, o café possui vários mitos de descobrimento, porém o mais conhecido mundialmente retrata um jovem Etíope que notou seus animais agitados após comer os pequenos frutos vermelhos da planta. Vendo que nenhum morreu ao ingerir os frutos, o jovem decidiu experimentar e logo sentiu os efeitos da cafeína. O jovem contou ao seu pai, que por conseguinte contou à outras pessoas e assim o café começou a fazer parte da cultura Etíope.

Inicialmente os frutos foram simplesmente mastigados, mas rapidamente os consumidores evoluíram para formas mais palatáveis de obter sua dose de cafeína (PENDERGRAST, 2010). A primeira menção escrita da bebida ocorreu no século 10 em um jornal médico por um persa, e anos depois outro médico escreveu sobre o café “Fortalece os membros, limpa a pele e seca as umidades que estão debaixo dela, e dá um cheiro excelente a todo o corpo,” (MORRIS, 2019; PENDERGRAST, 2010).

Mesmo sendo nativa da Etiópia, o café foi levado à Arábia em 1450, originando assim o nome *Coffee arabica*, onde foi cultivado na colônia de Harar. Quando a bebida chegou em Mecca, a mesma foi conduzida por peregrinos religiosos para diversos cantos do mundo islâmico, um século depois, o café achou seu caminho para o Egito e o Império Turco. Chegando na Europa a partir da Turquia, o café tem seu primeiro registro em Veneza, no ano de 1575. A partir disso, a popularidade da bebida à levou para outros países, negociações para importações do café para o continente Europeu se firmaram. Em 1696, é registrado a primeira plantação em terra colonial, quando a Holanda começa o cultivo em Java, país do sudeste asiático. Anos mais tarde, em 1712, o café chega a América do Sul, também por intermédio da Holanda, que agora usava seu território colonial no Suriname para iniciar plantios de café (CRAWFORD, 1852; MORRIS, 2019; SMITH, 1985).

Em 1727, uma disputa territorial levou à fatídica introdução do café para o Brasil. Para resolver uma disputa de fronteira, os governadores da França e a Guiana Holandesa pediu a um oficial luso-brasileiro neutro chamado Francisco de Melo Palheta para mediar a situação. Ele rapidamente concordou, esperando que poderia de alguma forma contrabandear sementes de café, já que nenhum dos governadores permitiam a exportação das sementes. O mediador negociou com sucesso uma solução de compromisso de

fronteira e deitou-se clandestinamente com a esposa do governador francês. Na partida de Palheta, ela o presenteou com um buquê de flores com bagas de café maduras escondidas no interior. Ele plantou as bagas em sua casa no território do Pará, de onde o café se espalhou gradualmente para o sul, iniciando assim a supremacia brasileira na cafeicultura, e influenciando a exploração e migração para terras do interior do país, uma vez que os produtores acreditavam que o plantio em solos “virgens” era o segredo da produção (REICHMAN, 2018; CRAWFORD, 1852; PENDERGRAST, 2010; SMITH, 1985; UKERS, 1935).

A produção teve um ritmo acelerado desde o início. Em 1774, o café chega na região do Rio de Janeiro, onde se desenvolveu de maneira consideravelmente melhor que no Pará devido ao clima moderado. Em 1829, após um século da introdução do café no Brasil, a exportação nacional já representava 40% da exportação mundial e o Brasil já ocupava o primeiro lugar na produção. Em 1906, o país atinge o máximo de fornecimento, com aproximadamente 85% das exportações mundiais (FRAGA, 1963). A força cafeeira do Brasil não só apenas supriu a demanda do mercado, mas também aumentou a própria demanda produzindo café suficiente, de maneira barata, para que a classe trabalhadora da América do Norte e da Europa pudesse também consumir a bebida (PENDERGRAST, 2010). Desde então, e mesmo não sendo atualmente o principal produto agrícola da pauta de exportação (NAKAZONE; SAES, 2004), o Brasil tem sempre estado em posição de destaque em produção e exportação, até mesmo em épocas de crises econômicas, como na quebra da bolsa em 1929 e nas grandes Guerras Mundiais.

Tabela 1 - Estatísticas da produção brasileira de café, 1870 – 1990.

Data	Produção brasileira (milhões de sacas)	Produção mundial (milhões de sacas)	Parte na produção mundial (%)
1870 – 71	3,1	6,6	46,9
1900 – 01	14,5	18,7	77,5
1930 – 31	25,1	37,0	67,8
1960 – 61	32,9	68,9	47,7
1990 - 91	28,5	98,4	28,9

Fonte: Adaptado de (MORRIS, 2019)

Tabela 2 – Países líderes de produção de café, por década.

1960	1970	1980	1990	2000	2010
Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil
Colômbia	Colômbia	Colômbia	Colômbia	Vietnam	Vietnam
Angola	Costa do Marfim	Indonésia	Indonésia	Colômbia	Colômbia
Uganda	México	México	Vietnam	Etiópia	Indonésia
Costa do Marfim	Indonésia	Costa do Marfim	Guatemala	Índia	Etiópia
México	Etiópia	Etiópia	Índia	México	Índia

Fonte: Adaptado de (MORRIS, 2019).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor de café no Mundo, responsável por aproximadamente 1/3 da produção mundial (International Coffee Organization, 2019). Mesmo que a cafeicultura esteja bastante presente em todo território nacional, com um total de 2,16 milhões de hectares (CONAB, 2020), a produção de café se concentra principalmente em seis Estados: Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Paraná, Bahia e Rondônia (BLISKA et al., 2009).

No estado de Minas Gerais, o café representa o principal produto exportado do setor agrícola, com uma área plantada aproximada de 1,28 milhões de hectares (CONAB, 2020) e, desde 1980, o estado ocupa posição de destaque como o principal produtor do Brasil (SIMÕES; PELEGRINI, 2010), sendo essa produção em boa parte devido as boas características edafoclimáticas de Minas Gerais. Além de influenciar de maneira significativa na economia do estado, o agronegócio do café é considerado como um grande fator de desenvolvimento regional, já que existe grande esforço com pesquisas e aplicações de novas tecnologias (VALE; CALDERANO; FAGUNDES, 2014),

Num contexto histórico, o comércio do café passou por diferentes fases quanto à diferenciação do produto e quanto à qualidade, fases essas denominadas por Skeie (2002) como “ondas de consumo”. A primeira onda ocorreu nas épocas que sucederam as grandes guerras mundiais, quando houve grande aumento na quantidade de consumo da bebida e mudanças no processamento e comercialização. A segunda onda surgiu como resposta à baixa qualidade do café da fase anterior, introduzindo cafés especiais e popularizando variações como o café expresso. A terceira onda, que vivemos atualmente, revoluciona o mercado de cafés especiais, mostrando a complexidade da bebida e seus fatores de diferenciação e de origem (GUIMARÃES; CASTRO JUNIOR; CARVALHO DE ANDRADE, 2016; BARONE, 2017; FERNANDES, 2019). E agora, juntamente com

essa terceira onda e com o mercado de cafés especiais, várias regiões produtoras estão utilizando o registro de Indicação Geográfica como uma ferramenta no comércio. Esse registro valoriza as qualidades únicas do produto, a tradição e territorialidade, agrega valor à bebida, gera reconhecimento e traz segurança para o produtor e consumidor.

2.2 Fatores que influenciam na cafeicultura

Um fator fundamental para a caracterização da vegetação é o ambiente em que ela se encontra. O ambiente, a partir da combinação de fatores climáticos e edáficos, que determina o crescimento de indivíduos e a dinâmica de interação entre os componentes envolvidos (EVANS; YOUNG, 1989a). Para estabelecer qualquer relação com o crescimento, biomassa, produtividade, entre outros, é necessário que o ambiente na qual a vegetação está inserida seja estudado e conhecido.

A utilização de variáveis ambientais, principalmente as climáticas, é um importante instrumento na análise da vegetação de um local (SANTANA et al., 2018). Além de considerar cada um individualmente, a relação entre elas também gera situações favoráveis ou desfavoráveis. A radiação solar quando associada com períodos úmidos e temperaturas quentes, permite um crescimento intensificado da planta. Precipitação e água disponível no solo permitem a germinação de sementes, estabelecimento de plântulas e crescimento, além de estar relacionado com a produção de biomassa. O sistema não funciona de forma ótima quando 1 ou mais fatores não se encontram em estados favoráveis (EVANS; YOUNG, 1989b). Características de terreno e as propriedades do solo também influenciam o ecossistema e no desenvolvimento de qualquer vegetação. Assim como as variáveis climáticas, a fertilidade, disponibilidade de nutrientes, textura, granulometria, capacidade de absorção do solo, declividade, tipo de solo, elevação, composição, entre outras características, estão relacionadas e afetam a distribuição de espécies, capacidade de produção e crescimento de uma floresta ou cultura (BAILEY, 2000).

Assim como qualquer outro tipo de vegetação, o crescimento e produção do café são influenciados também por fatores climáticos, e esses fatores são considerados os principais responsáveis pelas oscilações e frustrações em plantios de café no Brasil, principalmente nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo e Paraná (BENTO; DE CAMARGO; CAMARGO, 2010). Em destaque, a variação do fotoperíodo, distribuição de chuvas e temperatura do ar são considerados os fatores que mais

interferem nas fases fenológicas do café, causando problemas como abortamento de flores, atraso no desenvolvimento de frutos e, conseqüentemente, a produtividade e qualidades dos grãos (CAMARGO, et al., 2010; SANTOS LUZ et al., 2012). De acordo com Camargo (1985), as temperaturas médias anuais ideais para o cultivo variam entre 18° a 23°C. Acima de 23°C, o desenvolvimento dos frutos e a maturação dos frutos são aceleradas, levando à perda de qualidade. Já a faixa pluviométrica ideal para a produção varia entre 1.200 mm e 1.800mm (RAMOS ALVES et al., 2011). Estudos mostram que, devido a sensibilidade do café ao clima, a produção pode ser reduzida significativamente com as mudanças climáticas causadas por gases de efeito estufa, sendo as causas principais para essa redução a diminuição de totais de precipitação anuais e aumento de temperaturas, criando ambientes mais secos. Conseqüentemente, projeções mostram que áreas ótimas para o plantio serão deslocadas para regiões de maiores altitudes, que apresentam climas mais amenos (PHAM et al., 2019). Esse impacto ocorre pelo café ser uma cultura perene onde as plantas ficam no campo o ano todo, logo são submetidas a todo o ciclo climático sazonal (CHEMURA et al., 2016).

A partir da perspectiva da relação das características geomorfométricas com o café, estudos comprovam as influências existentes. A altitude é considerada um fator de influência indireto e o solo é um fator direto, tão importante quanto o clima, existindo evidências que a mesma é responsável pela variação da qualidade do café, uma vez que afeta o pH, umidade e até mesmo componentes fenólicos dos frutos. Estudos recentes mostram também que os grãos de melhor qualidade são produzidos em regiões mais elevadas (BORÉM et al., 2019; PEREIRA et al., 2021; RAMOS ALVES et al., 2011).

Considerando a influência de fatores climáticos e geomorfométricos na cafeicultura, incorporar os mesmos na modelagem da produtividade de cafezais se mostra uma oportunidade promissora para a obtenção de um modelo que expresse de forma efetiva a variável dependente.

2.3 A importância do estudo da produtividade

Produtividade mede a eficiência de um sistema de plantio de converter *inputs* (pés de café, fertilizantes, etc) em *outputs* (o produto café). A eficiência dessa conversão é afetada por diversos fatores como tecnologias aplicadas, irrigação, fertilizantes, extensão da área de plantio, condições climáticas, entre outros (BHATTARAI et al., 2020). Essa informação é de extrema importância pois influencia no preço das sacas de café, auxilia

no manejo, auxilia na tomada de decisão de diversas áreas de produção, e planejamento de custos e lucros da cultura, já que uma maior produtividade significa maior eficiência, diminuindo assim custos de produção por saca (SENAR, 2021).

No Brasil, estima-se que a área destinada ao plantio do café seja de 2,16 milhões de hectares e essa área tende a diminuir com o passar dos anos se acompanharmos o comportamento de safras passadas (CONAB, 2020). Porém, mesmo com a redução de áreas, o país consegue suprir a crescente demanda do mercado com investimentos em novas tecnologias e técnicas, para que ocorra aumento na produtividade da área. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento, as estimativas de produtividade são realizadas por ferramentas estatísticas e através do monitoramento agrometeorológico, que utiliza parâmetros de precipitação acumulada, temperaturas máxima ou mínima, além de informações de campos (CONAB, 2020).

Na Etiópia, um estudo foi desenvolvido para identificar os fatores que afetam a produtividade dos plantios de café. Foram escolhidos 120 produtores aleatórios no distrito, e a partir de estatística descritiva os plantios foram examinados e caracterizados. Foi utilizada a função de produção Cobb-Douglas para identificar e estimar os efeitos dos fatores socioeconômicos na produtividade do café. Como resultado, os colaboradores indicam que as variáveis explicativas aplicadas no modelo; fertilizante, área de plantio, mão de obra familiar, experiência do produtor, e localização foram consideradas estatisticamente significantes como fatores que afetam a produtividade (TUFA; TEMESGEN, 2017).

Em um estudo recente, foram utilizados dados espectrais para obter estimativas de produtividades da cultura. O modelo utilizado teve como base a penalização da produtividade potencial da cultura em função do déficit hídrico e da produtividade do ano anterior, ajustados por diferentes coeficientes de sensibilidade da cultura, em diferentes estádios fenológicos. Com a parametrização do modelo, obteve-se um valor de coeficiente de determinação (R^2) variando entre 0,79 a 0,95, e um índice de concordância “d” de Willmott de 0,93 a 0,95, entre a produtividade real e a estimada. Os resultados satisfatórios comprovaram o potencial da aplicação do modelo agrometeorológico-espectral para obtenção da estimativa da produtividade a nível de fazendas (ALMEIDA; SEDIYAMA; DE ALENCAR, 2017). E ainda na área de sensoriamento remoto, um estudo publicado em 2018 analisou a relação entre a produtividade de plantios de café com índices de vegetações derivados de imagens com e sem correção topográfica do sensor LANDSAT-8 (NOGUEIRA; MOREIRA; VOLPATO, 2018). Além disso, foram

considerados variáveis de fase fenológica e ano mais e menos produtivo. Foi encontrado que a melhor fase fenológica para determinar a produtividade do café por índices espectrais ocorre na fase de dormência das flores. Além disso, o NVDI foi apontado como o melhor índice para modelar a produtividade de pés de café, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) variando de 0,58 a 0,90. Houve um aumento da relação de produtividade e do NDVI com correção topográfica na fase de dormência e no ano de baixa produtividade; aumento no R^2 entre produtividade e NDVI com correção topográfica na fase de floração no ano mais produtivo; e aumento no R^2 entre a produtividade e nos índices SAVI e NDWI com correção topográfica na fase de floração no ano de alta produtividade (NOGUEIRA; MOREIRA; VOLPATO, 2018).

2.4 Uso do Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas na cafeicultura

Geotecnologias como o sensoriamento remoto (SR) e os sistemas de informações geográficas (SIG) são ferramentas de grande aplicação e importância em levantamentos e caracterizações de florestas, culturas agrícolas e até mesmo em áreas urbanas, auxiliando em tomadas de decisões, planejamentos e estudos de recursos existentes numa área (TRABAQUINI et al., 2010). A utilização desses recursos na cafeicultura vem sendo cada vez mais frequente, mas ainda existe muito espaço para o desenvolvimento operacional, gerando informações que podem contribuir em estatísticas oficiais do produto (MOREIRA et al., 2010).

Cordero-Sancho e Sander publicaram em 2007 um artigo sobre análises espectrais e acurácia de classificações em culturas de café a pleno sol e sombreado, e outros tipos de coberturas vegetais na Costa Rica, utilizando imagens do satélite Landsat, e um modelo de estratificação baseado na elevação e precipitação da região. As classificações que utilizaram apenas as bandas do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio mostraram menor acurácia (49,14%) que classificações com mais bandas e dados auxiliares (65,19%). As acurácias de produtor e de usuário foram as mais altas para café a pleno sol (86,2 e 68,4%) e sombreado (91,8 e 61,1%) quando se utilizou as bandas 3, 4, 5, 6 e 7, o NDVI, o ângulo de incidência $\cos(i)$ e um modelo de estratificação (CORDERO-SANCHO; SADER, 2007). O estudo obteve resultados moderados, porém satisfatórios quando comparado com resultados de um estudo anterior de 2004, que

objetivou distinguir plantações de café e formações florestais (CORDERO-SANCHO, 2004)

Em 2008, pesquisadores do INPE publicaram um estudo onde buscaram adequar uma metodologia fundamentada em geotecnologias para a delimitação e caracterização da cultura do café em Minas Gerais. A área de estudo foram os municípios de Aguanil, Boa Esperança, Campo Belo e Cristais. Foram utilizadas imagens do sensor CCD a bordo do satélite CBERS e imagens do sensor TM a bordo do LANDSAT-5. Para a classificação dessas imagens, foi selecionado o algoritmo de classificação supervisionada de Máxima Verossimilhança e em seguida realizada a interpretação visual para a correção dos erros de omissão e inclusão. Os resultados mostraram uma acurácia global de apenas 23,4%. As imagens dos satélites escolhidos não se mostraram adequadas para o estudo, pois há grande mistura espectral entre diferentes tipos de vegetações e também sofrem influências do relevo acidentado da área de estudo. Logo, concluiu-se que não é possível obter um resultado favorável de classificação e identificação de lavouras de café utilizando essas imagens, e recomenda-se o uso de imagens com maior resolução espacial como dos satélites SPOT4 e SPOT 5 (MOREIRA; BARROS; RUDORFF, 2008).

Em 2013 Pereira Coltri et. al. publicaram seu trabalho sobre estimativa da biomassa e do estoque de carbono de plantios de café, utilizando imagens de satélite de alta resolução espacial. O estudo buscou relacionar índices de vegetações, obtidos das bandas de imagens do satélite GeoEye-1, com propriedades biofísicas do café, incluindo biomassa e carbono. O trabalho também buscou estabelecer uma relação empírica entre os dados espectrais, medições de campo e biomassa, permitindo o cálculo da biomassa e estoque de carbono através de métodos não destrutivos. As bandas do infravermelho próximo, do vermelho e do verde mostraram uma correlação significativa com a biomassa, mas a melhor correlação ocorreu com os índices de vegetação NDVI, RVI, GNDVI, permitindo assim estimar o estoque de carbono em plantios de café da área de estudo. A correlação empírica foi alcançada com sucesso e foi possível criar um modelo para estimar a biomassa (PEREIRA COLTRI et al., 2013a).

Outro estudo, também relacionado com a biomassa na cafeicultura, buscou investigar propriedades biofísicas do café com o índice de área foliar (IAF) e com a biomassa acima do solo em dois sistemas de produção: plantios a pleno sol e plantios em sistema agroflorestal, sombreado com árvores de macadâmia. O trabalho propõe estabelecer relações para que seja possível calcular a biomassa e o IAF através de métodos não destrutivos, utilizando medidas de campo e dados agrometeorológico. O IAF foi

relacionado com a estrutura de copa, mas é altamente influenciado por variações sazonais, que podem ser identificadas utilizando através do “Water Requirements Satisfaction Index (WRSI)”, índice esse relacionado com perdas relativas na produção de cultivos devido a ocorrências de estresses hídricos. Foi observado que o IAF tem maior decréscimo em períodos mais secos para sistemas a pleno sol que sistemas sombreados pela atividade agroflorestal. A biomassa acima do solo para o café foi calculada inicialmente através do método destrutivo e então desenvolvida uma equação empírica, tendo como base principalmente a altura dos pés de café e a circunferência do tronco (10 cm acima do solo). Com essas informações, foi possível calcular também o estoque de carbono nos dois sistemas de plantio. Ambos apresentaram valores significativos, mas o sistema de plantio sombreado pelas árvores de macadâmia apresentaram o maior valor, obviamente. Ambos os sistemas podem ser considerados como medidas mitigadoras já que ambos estocam carbono em sua biomassa, retirando assim o carbono da atmosfera e contribuindo com a diminuição de GEE (COLTRI et al., 2015).

Utilizada também para caracterizar a cultura, a geotecnologia foi aplicada à caracterização dos ambientes cafeeiros da região Serra da Mantiqueira de Minas Gerais por Alves et al., em 2015. O projeto objetivou caracterizar de forma detalhada a cafeicultura na região, utilizando imagens do satélite RapidEye e os softwares ArcGis e SPRING. Os resultados mostraram que plantios de café ocupam aproximadamente 8% da região, sendo distribuídos em sua maior parte em áreas declivosas e de altitude. A caracterização da área contribuiu para a melhor compreensão dos fatores envolvidos na produção de cafés especiais produzidos nessa região e forneceu uma base científica para a obtenção da Indicação Geográfica de Denominação de Origem (ALVES et al., 2015)

Recentemente, um estudo realizado por MARIN et al. (2019), buscou identificar e mapear o estresse causado por variáveis bióticas e abióticas em lavouras cafeeiras utilizando índices de vegetação obtidos de imagens multiespectrais Landsat. Análises de incidência de cercosporiose e de infestação do bicho-mineiro nas folhas, de pH, matéria orgânica e textura do solo e teores foliares de nutrientes foram realizadas em cada um dos pontos amostrais e correlacionadas com 16 índices de vegetação obtidos de imagens referentes à época das análises. Os índices de vegetação apresentaram distribuição espacial semelhante à distribuição espacial das variáveis agronômicas, na lavoura. Houve correlação positiva dos índices com a infestação do bicho-mineiro e com os teores de silte e argila no solo e concentrações de Mg, Cu, B e Mn nas folhas, e negativa, com a incidência de cercosporiose e com pH e teor de areia do solo. De acordo com os

resultados, foi possível mapear e identificar as alterações na reflectância espectral dos cafeeiros, causadas por essas variáveis agronômicas (MARIN et al., 2019).

A grande aplicabilidade do sensoriamento remoto e dos sistemas de informações geográficas na cafeicultura se torna evidente quando observamos a grande quantidade de estudos existentes, além disso, incentiva novas pesquisas no setor cafeeiro envolvendo as geotecnologias e explora as possibilidades que essas ferramentas nos fornece.

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Destaca-se a importância desse estudo para cafeicultura com uma visão econômica e também ambiental. Aplicar tecnologias na cafeicultura, permite que o setor cresça e se desenvolva, buscando otimizar o processo de produção do café, diminuindo custos, aumentando produtividade por área e agregando valor ao produto na etapa de comércio. Com esse estudo busca-se determinar uma possível correlação da produtividade de plantios de café com variáveis climáticas, variáveis de terreno e variáveis espectrais de imagens, trazendo e agregando mais informações sobre os fatores que influenciam na cafeicultura e possibilitando que a comunidade tome melhores decisões na implementação e no manejo do café.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-KADER, F. H. Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 14, n. 1, p. 29–40, 1 jun. 2011.
- ALMEIDA, T. S.; SEDIYAMA, G. C.; DE ALENCAR, L. P. Estimativa Da Produtividade De Cafeeiros Irrigados Pelo Método Zona Agroecológica Espectral. **Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng**, v. 25, n. 1, p. 1–11, 2017.
- ALVES, H. M. R. et al. Geotecnologias aplicadas à caracterização dos ambientes cafeeiros da Mantiqueira de Minas. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. 2015.
- ANDRÉ, C. M. G.; REGAZZI, A. J. **Crítérios para seleção de modelos baseados na razão de verossimilhança**. Disponível em: <<http://arquivo.ufv.br/dbg/resumos2008b/Resumo%20Claudomiro.htm>>. Acesso em: 2 mar. 2022.
- BAILEY, S. W. Geologic and Edaphic Factors Influencing Susceptibility of Forest Soils to Environmental Change. p. 27–49, 2000.
- BARONE, M. **Cafés especiais e salto de escala: Análise do circuito espacial produtivo e dos círculos de cooperação dos cafés especiais no sul de Minas Gerais**. 2017.
- BERNARDES, T. et al. Monitoring Biennial Bearing Effect on Coffee Yield Using MODIS Remote Sensing Imagery. **Remote Sensing 2012, Vol. 4, Pages 2492-2509**, v. 4, n. 9, p. 2492–2509, 27 ago. 2012.
- BHATTARAI, C. et al. Factors affecting the productivity of coffee in Gulmi and Arghakhanchi districts of Nepal. **Journal of Agriculture and Natural Resources**, v. 3, n. 1, p. 51–60, 2 jan. 2020.
- BLISKA, F. et al., Custos de produção de café nas principais regiões produtoras do Brasil. **Informações Econômicas**, v. 9, p. 16 – 39, 2009.
- BORÉM, F. M. et al. Meteorological variables and sensorial quality of coffee in the mantiqueira region of minas gerais variáveis meteorológicas e qualidade sensorial do café na região da mantiqueira de minas gerais. **Coffee Science**, v. 14, n. 1, p. 38–47, 2019.
- CAMARGO, M. B. P. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in brazil. **Agrometeorology**, n. 1, p. 239–247, 2010.
- CASTRO, R. Remote monitoring of coffee cultivation through computational processing of satellite images. **Proceedings - 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2019**, p. 13–18, 1 out. 2019.
- CERASOLI, S. et al. On estimating the gross primary productivity of Mediterranean grasslands under different fertilization regimes using vegetation indices and hyperspectral reflectance. **Biogeosciences**, v. 15, n. 17, p. 5455–5471, 14 set. 2018.

CHEMURA, A. et al. Bioclimatic modelling of current and projected climatic suitability of coffee (*Coffea arabica*) production in Zimbabwe. **Regional Environmental Change**, v. 16, n. 2, p. 473–485, 2016.

COLTRI, P. P. et al. Empirical models to predict LAI and aboveground biomass of *Coffea arabica* under full sun and shaded plantation: a case study of South of Minas Gerais, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 89, n. 4, p. 621–636, 2015.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira 2020** Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Brasília: [s.n.].

Conselho dos Exportadores de Café do Brasil -. Disponível em: <<https://www.cecafe.com.br/>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

CORDERO-SANCHO, SILVIA. **Landsat Spectral Analysis, Waveband Selection and Classification Accuracy Assessment of Coffee Plantation in Central America**, 2004.

CORDERO-SANCHO, S.; SADER, S. A. Spectral analysis and classification accuracy of coffee crops using Landsat and a topographic-environmental model. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 7, p. 1577–1593, 2007.

CRAWFORD, J. History of Coffee. Source: **Journal of the Statistical Society of London**, v. 15, n. 1, p. 50–58, 1852.

Curvature function | ArcGIS for Desktop. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>>. Acesso em: 16 maio. 2022.

EVANS, R. A.; YOUNG, J. A. Characterization and Analysis of Abiotic Factors and Their Influences on Vegetation. **Grassland structure and function** p. 13–28, 1989.

FERNANDES, T. A. P. PORTARIA IMA Nº 1.920, DE 15 DE MAIO DE 2019. **Instituto Mineiro de Agropecuária**, 2019.

FORTES, C.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M. Estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar por dados espectrais orbitais ETM+/LANDSAT 7 <p>Sugarcarne agroindustrial yield forecast by orbital sensor ETM+/LANDSAT 7 data. **AMBIÊNCIA**, v. 5, n. 3, p. 489–504, 23 dez. 2009.

Fraga, C.C., 1963. Resenha histórica do café no Brasil. **Agricultura em São Paulo**, 10(1), pp.1-21.

GONZÁLEZ, F. A.; GÓMEZ, J. J.; AMAYA, D. F. Multispectral image processing in coffee and cocoa crops. **Revista CINTEX**, v. 22, n. 2, p. 51–67, 30 dez. 2017.

GUIMARÃES, E. R.; CASTRO JUNIOR, L. G.; CARVALHO DE ANDRADE, H. C. A terceira onda do café em minas gerais. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 18, n. 3, p. 214–227, 2016.

HANNA, A. Y.; HARLAN, P. W.; LEWIS, D. T. Soil Available Water as Influenced by Landscape Position and Aspect1. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 6, p. 999–1004, 1 nov. 1982.

INFLUÊNCIAS NO PREÇO – Centro do Comércio de Café do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://cccmg.com.br/influencias-no-preco/>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

ICO. International Coffee Organization. Disponível em: <[International Coffee Organization - What's New \(ico.org\)](http://www.icao.org)>. Acesso em: 27 ago, 2021.

KASPAR, T. C. et al. Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. **Precision Agriculture** **2003 4:1**, v. 4, n. 1, p. 87–101, mar. 2003.

MARIN, D. B. et al. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 66, n. 2, p. 142–153, 2019.

MATCHAM, E. G. et al. Soil and terrain properties that predict differences in local ideal seeding rate for soybean. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 3, p. 1981–1991, 1 maio 2020.

MOREIRA, M. A. et al. Geotecnologias para mapear lavouras de café nos estados de minas gerais e são paulo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1123–1135, 2008.

MORRIS, J. **Coffee: A Global History**. London: Reaktion Books, 2019.

NEATH, A. A.; CAVANAUGH, J. E. The Bayesian information criterion: background, derivation, and applications. **WIREs Comput Stat**, v. 4, p. 199–203, 2012.

NOGUEIRA, S. M. C.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L. Relationship between coffee crop productivity and vegetation indexes derived from oli / landsat-8 sensor data with and without topographic correction. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 3, p. 387–394, 1 maio 2018a.

PENDERGRAST, M. **Uncommon grounds: the history of coffee and how it transformed our world**. Revised Edition ed. New York: Basic Books, 2010.

PEREIRA COLTRI, P. et al. Coffee crop's biomass and carbon stock estimation with usage of high resolution satellites images. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1786–1795, 2013a.

PEREIRA, P. V. et al. Effect of altitude and terrain aspect on the chemical composition of Coffea canephora cherries and sensory characteristics of the beverage. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 6, p. 2570–2575, 1 abr. 2021.

PHAM, Y. et al. The impact of climate change and variability on coffee production: a systematic review. **Climatic Change**, v. 156, n. 4, p. 609–630, 1 out. 2019.

PIRES, M. DE M. et al. Impactos do crescimento do consumo de cafés especiais na competitividade inter-regional da atividade cafeeira. **Revista de economia e sociologia rural**, v. 41, n. 3, p. 53–71, 2003.

RAMOS ALVES, H. M. et al. Características ambientais e qualidade da bebida dos cafés do estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 261, p. 12, 2011.

REICHMAN, D. R. Big Coffee in Brazil: Historical Origins and Implications for Anthropological Political Economy. **The Journal of Latin American and Caribbean Anthropology**, v. 23, n. 2, p. 241–261, 1 jul. 2018.

SANTANA, R. C. et al. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 197-706, ago. 2008.

SANTOS LUZ, M. P. et al. Caracterização da temperatura do ar e precipitação em áreas cafeeiras na região da serra da mantiqueira de minas gerais. **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**.

Disponível em: < <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/3107> > Acesso em: 19 abr. 2021.

SENAR. **SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DO CAFÉ - Portal Senar FIC**. Disponível em: <<http://ead.senar.org.br/cursos/sustentabilidade-na-produção-do-café>>. Acesso em: 3 out. 2021.

SHASHIKANT, V. et al. Utilizing TVDI and NDWI to Classify Severity of Agricultural Drought in Chuping, Malaysia. **Agronomy 2021, Vol. 11, Page 1243**, v. 11, n. 6, p. 1243, 19 jun. 2021.

SIEFERT, A. et al. Scale dependence of vegetation-environment relationships: A meta-analysis of multivariate data. **Journal of Vegetation Science**, v. 23, n. 5, p. 942–951, out. 2012.

SIMÕES, J. C.; PELEGRINI, D. F. **Diagnóstico da cafeicultura mineira-regiões tradicionais: Sul/ Sudoeste de Minas, Zona da Mata, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba**, 2010.

SKEIE, T. Norway and coffee, 2002. Disponível em: <https://timwendelboe.no/uploads/the-flamekeeper-2003.pdf>. Acesso em 14 ago 2009

SMITH, R.F. (1985). A History of Coffee. In: Clifford, M.N., Willson, K.C. (eds) **Coffee**. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1_1

NAKAZONE D, SAES MS. O agronegócio café do Brasil no mercado internacional. **Revista Fae Business**. 2004.

TRABAQUINI, K. et al. Uso da geotecnologia para caracterizar os cafezais no município de londrina-pr, em relação à altimetria, declividade e tipo de solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1136–1147, 2010.

TUFA, A.; TEMESGEN, A. Analysis of Coffee Farm Productivity in Darolabu District. **American Journal of Environmental and Resource Economics**, v. 2, n. 5, p. 158–161, 2017.

UKERS, W. H. **All About Coffee**. Second Edition ed. New York: The Tea & Coffee Trade Journal Company, 1935.

VALE, A. R. DO; CALDERANO, R. A. P.; FAGUNDES, F. N. The Coffee Production in Minas Gerais: comparative study between regions Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba

and South/Southwest. **CAMPO-TERRITÓRIO: revista de geografia agrária**, n. Edição especial do XXI ENGA-2012, p. 1–23, 2014.

VEGRO, C. L. R.; DE ALMEIDA, L. F. **Global coffee market: Socio-economic and cultural dynamics**. [s.l.] Elsevier Inc., 2019.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

ARTIGO 1 - Modelagem da produtividade de plantios de café utilizando parâmetros bioclimáticos, geomorfométricos e dados espectrais

Thainá Guimarães Rocha; Kalill Pascoa; Fausto Weimar Acérbi Júnior

Abstract

Given the economic, social and cultural importance of coffee production in Brazil and especially in Minas Gerais, finding new ways to characterize and determine factors that influence production is a need that allows coffee growing more and more. Therefore, this research aimed to model the coffee productivity of the municipalities in the Campos das Vertentes region using bioclimatic, spectral and geomorphometric variables. The bioclimatic variables were created based on data from the region's climate stations, the geomorphometric variables derived from the 30m SRTM Digital Elevation Model and the spectral variables derived from Sentinel – 2 imagery data (10m). Using the Pearson correlation method, we were able to pre-select possible variables that would later compose the global linear regression model and the final regression model. The final, and chosen, regression model ($R^2 = 0,71$ and $R^2_{ajus} = 0,54$) presented 6 spectral and geomorphometric variables, being: NDVI, NDWI, Green band, Blue band, Profile Curvature and Valley Depth. Our results show that it was possible to correlate and estimate the coffee productivity of the municipalities of the Campo das Vertentes region from bioclimatic, spectral and geomorphometric variables. More studies are encouraged to better understand the relations between coffee and other variables.

Keywords: Estimation. Linear regression model. Campo das Vertentes

INTRODUÇÃO

Classificado como uma *commodity* agrícola, o café é uma espécie perene nativa das regiões altas da Etiópia que requer algumas condições específicas para manter a qualidade. Os maiores produtores mundiais são, de maneira geral, países em desenvolvimento e os maiores consumidores por sua vez, são países desenvolvidos (VEGRO; DE ALMEIDA, 2019). A popularidade da bebida e a crescente demanda pode ser explicada pela acessibilidade ao produto por qualquer classe social e econômica, além de estudos provarem que o café traz benefícios a saúde e melhora a performance em determinadas atividades (VEGRO; DE ALMEIDA, 2019).

No Brasil, a cafeicultura sempre esteve em destaque desde a sua chegada no fim do século 18. A produção já de início influenciou a exploração do país como um todo, uma vez que os produtores buscavam solos virgens para obter sucesso nos plantios. No começo do século 20, o Brasil chegou a ser responsável por mais de 75% da produção mundial de café (REICHMAN, 2018). Atualmente, o agronegócio cafeeiro brasileiro é responsável por aproximadamente 1/3 da produção mundial, fazendo com que o país assuma a colocação de maior produtor do mundo, produzindo entre 57 milhões e 62 milhões de sacas por ano (CONAB, 2020). Os principais estados produtores são Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Paraná, Bahia e Rondônia. Minas Gerais se destaca por produzir quase metade da produção nacional, tendo área plantada de 1,28 milhão de hectares. A cafeicultura mineira contribui significativamente para a economia do estado e é considerado como fator de desenvolvimento, influenciando em pesquisas e investimentos em novas tecnologias (VALE; CALDERANO; FAGUNDES, 2014). Além disso, o estado se destaca também na produção de cafés especiais, um mercado relativamente novo que se baseia na produção de cafés de qualidade com propriedades únicas. Esse mercado, cada vez mais, tem utilizado registros de Indicação Geográfica como ferramenta para agregar valor ao produto e trazer reconhecimento para a tradição e territorialidade do café mineiro (BARONE, 2017).

A importância do café faz com que cada vez mais sejam realizados novos estudos e pesquisas, trazendo inovação e novas tecnologias para o setor. Predizer, caracterizar e determinar fatores que influenciam na produção permite a cafeicultura crescer cada vez mais. As previsões de produtividades das safras é uma informação de extrema importância para o setor, cujos resultados influenciam no mercado nacional e internacional do café já que o mesmo é normalmente negociado no mercado futuro

(“INFLUÊNCIAS NO PREÇO – Centro do Comércio de Café do Estado de Minas Gerais,” 2022). Por isso, se faz necessário que os métodos de obtenção desses valores sejam sempre estudados e analisados, implementando o uso de novas tecnologias para aprimorá-los. Atualmente no Brasil, as previsões de produtividade são realizadas pela Companhia Nacional de Abastecimento a partir de dados de campo e dados agrometeorológicos (CONAB, 2020).

Um recurso cada vez mais presente nas análises e estudos da cafeicultura é o sensoriamento remoto e os sistemas de informações geográficas (MOREIRA et al., 2010). Essa tecnologia mostrou grande potencial em mapeamentos e também estudos de fatores limitantes, de produção, entre outros. Os índices de vegetação, que são derivados das imagens de satélite, expressam boa correlação com as fases fenológicas de florestas e também de plantações agrícolas, e incorpora-los em modelos e análises pode contribuir para a obtenção de resultados melhores (NOGUEIRA; MOREIRA; VOLPATO, 2018a).

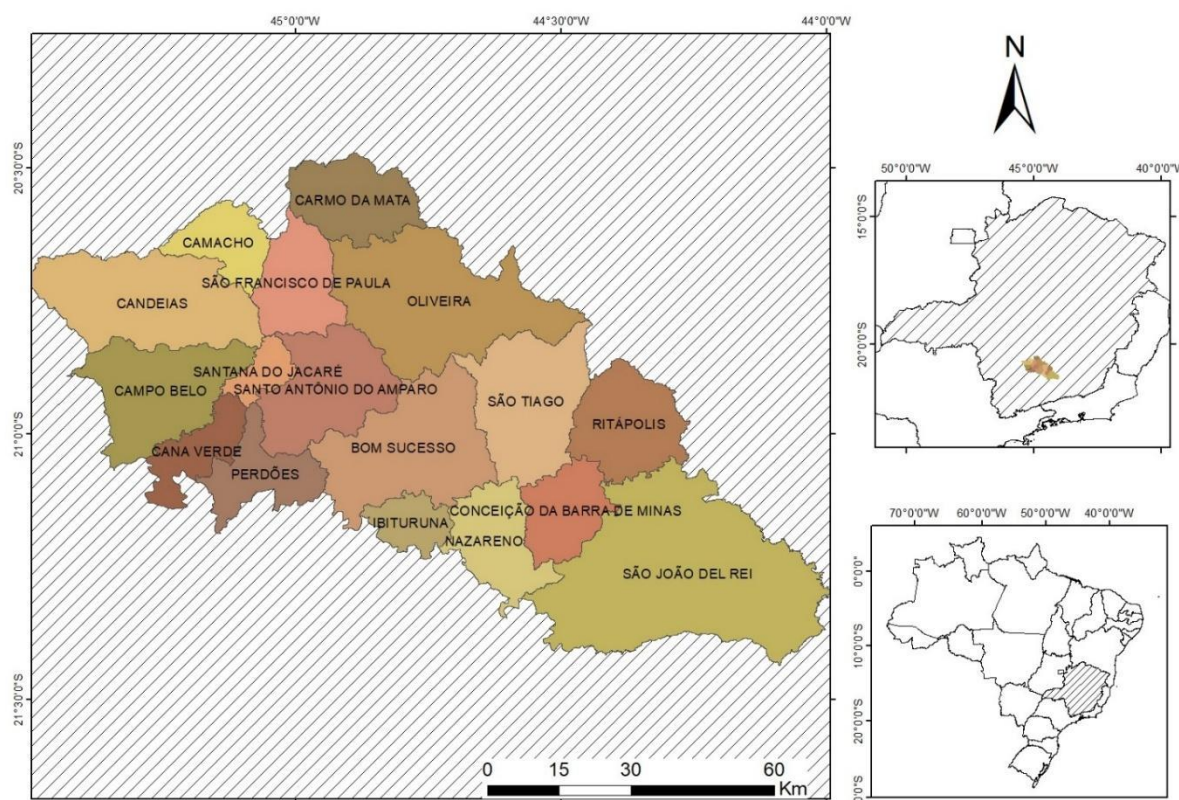
Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é gerar um modelo de produtividade para a região Campo das Vertentes a partir de dados climáticos, dados de terreno e dados espectrais de imagem. Para isso, temos que: (1) determinar a correlação das variáveis com a produtividade; (2) a partir do método de regressão, obter um modelo de produtividade que consiga representar a produtividade da região; (3) avaliar e compreender as variáveis selecionadas pelo modelo.

MATERIAIS E MÉTODO

Área de estudo

A área de estudo compreende 17 municípios de Minas Gerais, que correspondem à região cafeeira Campo das Vertentes, delimitada a partir de estudos históricos das primeiras fazendas de café estabelecidas na região. Fazem parte dessa região os municípios: Bom Sucesso, Camacho, Campo Belo, Cana Verde, Candeias, Carmo da Mata, Conceição da Barra de Minas, Ibituruna, Nazareno, Oliveira, Perdões, Ritópolis, Santana do Jacaré, Santo Antônio do Amparo, São Francisco de Paula, São João Del Rei e São Tiago (Figura 1). Sua posição geográfica encontra-se delimitada por um retângulo envolvente com as coordenadas 20° 25' e 21° 30' de Latitude Sul e 44° 20' e 45°30' de Longitude Oeste.

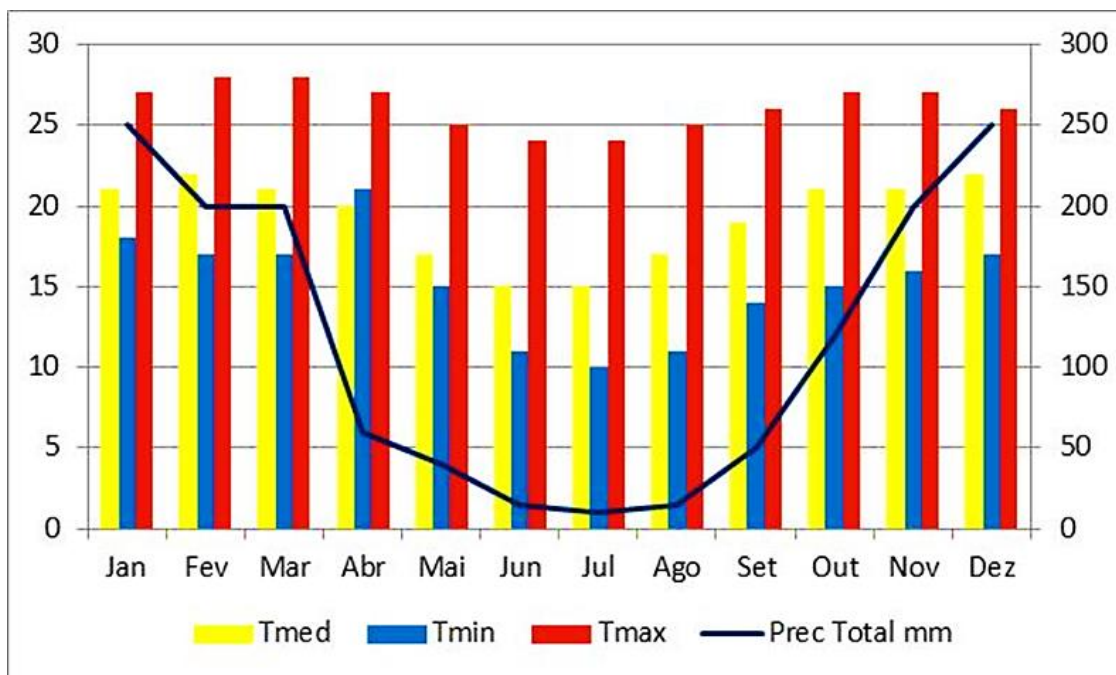
Figura 1 - Localização da região Campo das Vertentes em Minas Gerais para o produto café, temperaturas médias e precipitação média anual.



Fonte: Do Autor, 2022.

A temperatura média anual da região é de 20°C. Já a temperatura média mínima e máxima anual é de 14°C e 26°C respectivamente. A precipitação média anual da região é de 1400mm, constituída principalmente de chuvas derivadas dos meses quentes – entre outubro e março (Figura 2).

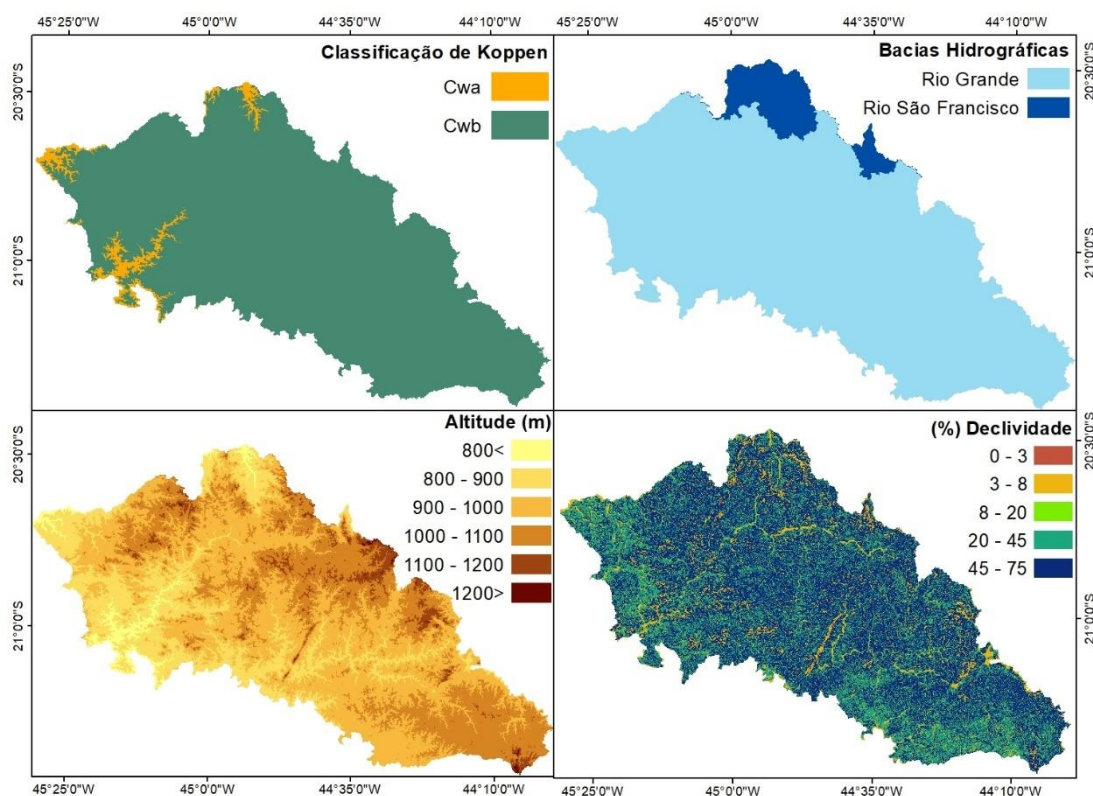
Figura 2– Valores de precipitação e temperatura para a região Campo das Vertentes.



Fonte: Adaptado de Volpato; Alves, 2019.

De acordo com a classificação de Koppen, encontramos dois tipos de clima. Sendo: o clima Cwa, característico por ser um clima temperado, apresentando um inverno seco e verão quente; e o clima Cwb, também caracterizado por um clima temperado, com inverno seco e verão fresco. Pertencendo em sua maioria (93%) à Bacia do Rio Grande e uma pequena porção (7%) à Bacia do Rio São Francisco, a região apresenta uma área total de 864.523 hectares, cujas altitudes variam de 800m a 1200m, com um relevo predominantemente ondulado (55,4%), permitindo ainda a mecanização da cafeicultura na região. O restante é distribuído nas classes de relevo suave ondulado com 32,6%, plano com 7,6% e montanhoso com 4,3% (Figura 3).

Figura 3– Características geográficas da região Campo das Vertentes.



Fonte: Do Autor, 2022.

Dados de produtividade por município

A base de dados de produtividade foi determinada pela Empresa De Pesquisa Agropecuária De Minas Gerais (EPAMIG) e constam informações de produtividade média das safras dos municípios pertencentes à área de estudo, de janeiro de 2021 a setembro de 2021.

Variáveis geomorfométricas

Para a obtenção das variáveis geomorfométricas, primeiramente foi necessário obter o Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE utilizado deriva do projeto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que gera imagens de radar com resolução espacial de 30m. Para download do MDE, foi utilizado o Google Engine, plataforma de análise geoespacial baseada na nuvem, que permite aos usuários visualizar e analisar imagens de satélite do planeta.

As variáveis geomorfométricas apresentadas na tabela 1 foram extraídas do MDE SRTM, não sendo realizada nenhuma pré-seleção. Sendo assim, foram extraídas as variáveis presentes na função *default* do *software* SAGA GIS, programa utilizado para a

obtenção das mesmas. Assim como o arquivo de origem, o *output* das variáveis é dado como imagens *raster*, apresentando também uma resolução espacial de 30m.

Tabela 1 - Variáveis geomorfológicas utilizadas na modelagem da produção.

Nome	Descrição	Referência
Digital Elevation Model (DEM)	Altitude em metros de cada pixel da área de estudo	
Aspect (AS)	Orientação da inclinação em relação ao norte	Wilson; Gallant, 2000
Analytical Hillshade (AH)	Ângulo entre o sol e a superfície terrestre	Tarini et al., 2006
Channel Network Base Level (CNBL)	Distância até uma base de rede de canais	Conrad, 2002
Channel Network Distance (CND)	Distância da rede de canais	Köthe, 1996
Closed Depressions (CD)	Área cercada por terrenos mais altos em todas as direções.	Watson, 1986
Convergence Index (CI)	Identifica a direção de fluxo de pixels vizinhos	Köthe, 1996
LS Factor (LSF)	Fator inclinação-comprimento	Desmet; Govers, 1996
Plan Curvature (PLC)	Curvatura do plano	Heerdegen; Beran, 1982
Profile Curvature (PRC)	Curvatura do perfil	Heerdegen; Beran, 1982
Relative Slope Position (RSP)	Posição de cada célula em relação ao topo e base das áreas	Boehner; Selige, 2006
Slope (S)	Inclinação	Travis et al., 1975
Topographic Wetness Index (TWI)	A viabilidade de um sítio acumular água	Beven and Kirkby (1979)
Valley Depth (VD)	Distância vertical em relação á vales	Conrad, 2012
Watershed Basins (WB)	Bacias Hidrográficas	Conrad, 2001

Fonte: Do Autor, 2022.

Variáveis espectrais

As variáveis espectrais também foram obtidas pelo Google Earth Engine. Os índices de vegetação (IV) foram gerados utilizando a de matemática de bandas do satélite Sentinel, que possui uma resolução espacial de 10m. Considerando o ciclo do café, foram obtidos os índices de vegetação NDVI, NDWI, SAVI e EVI para a época seca e para época chuvosa. O NDVI é baseado no contraste entre a presença de pigmentos fotossintéticos (refletância vermelha) e a dispersão interna da radiação na folha (refletância no infravermelho próximo) (ROUSE et al., 1973). Huete (1988) sugeriu a utilização do índice SAVI para minimizar as influências da reflectância dos solos, incorporando o fator L ao NDVI. O valor de L varia de 0 a 1 de acordo com a densidade da vegetação sendo necessária análise para diferentes biomas e situações agrícolas. Nesta análise, foi adotado $L = 1$. O NDWI é sensível a mudanças no conteúdo líquido de água das copas da vegetação expressando a relação entre os valores de refletância nas regiões espectrais do infravermelho de ondas curtas afetadas pela absorção de água, e infravermelho próximo (GAO, 1996). O índice EVI é um cálculo que leva em consideração o vermelho e infravermelho próximo como o NDVI, mas utiliza a banda do azul para descontar influências atmosféricas no índice.

Além dos índices, foram considerados também valores das bandas espectrais 2, 3, 4 e 8, que correspondem as bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente. Todas as bandas utilizadas apresentam resolução espacial de 10m. Com o intuito de minimizar o efeito da sazonalidade em nossas análises, foram obtidos valores das bandas em época seca e úmida.

Tabela 2 - Índices espectrais utilizados na modelagem da produção.

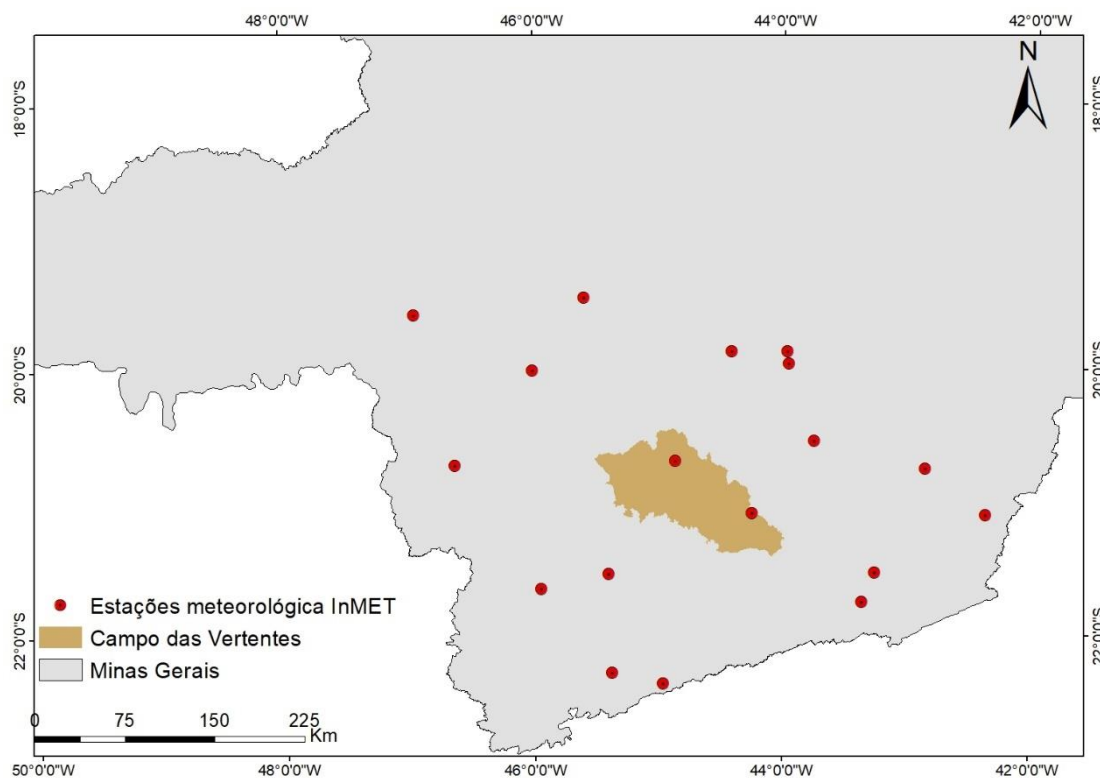
Índices espectrais	Nome	Fórmula	Referência
EVI	Enhanced Vegetation Index	$G \frac{NIR - Red}{NIR + C1Red * -C2Blue * +L}$	Huete, 1997
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	$\frac{NIR - Red (1 + L)}{NIR + Red + L}$	Huete, 1998
NDWI	Normalized Difference Water Index	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	Gao, 1996
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Rouse et al., 1973

Fonte: Do Autor, 2022.

Variáveis climáticas

Em busca de obtermos variáveis climáticas regionais em menor escala, utilizamos dados das estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia, no período de outubro de 2020 a setembro de 2021. Ao todo foram selecionados dados de 18 estações climatológicas sendo elas: Araxá, Bambuí, BH Cercadinho, Coronel Pacheco, Dores do Indaiá, Florestal, Juiz de Fora, Machado, Maria da Fé, Muriaé, Oliveira, Ouro Branco, BH Pampulha, Passa Quatro, Passos, São João del Rei, Varginha e Viçosa (Figura 4).

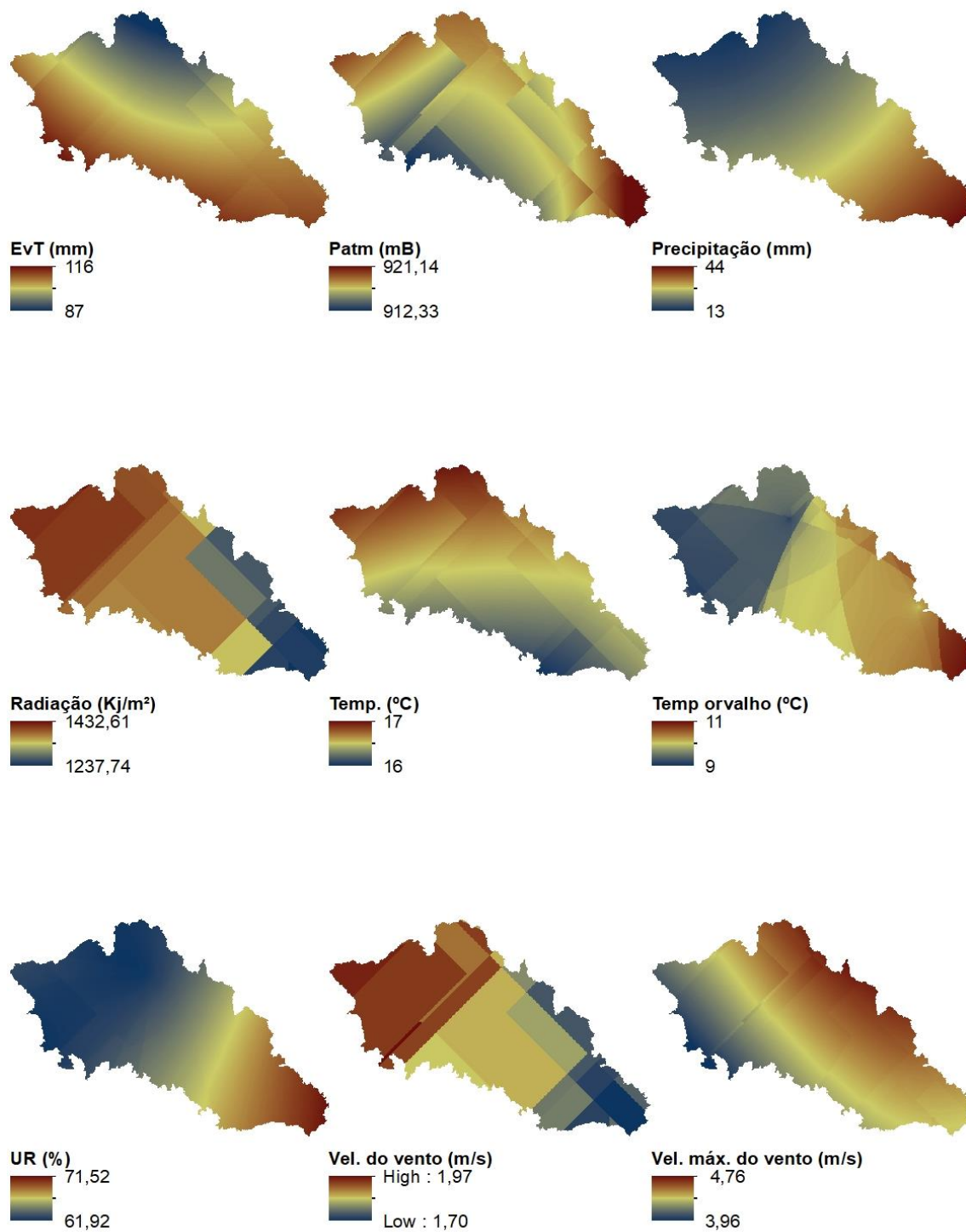
Figura 4 - Distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas na obtenção das variáveis climáticas.



Fonte: Do Autor, 2022.

Os dados foram separados por estações do ano, primavera, verão outono e inverno, gerando variáveis climáticas para cada uma. A partir dos dados, foram criados *rasters* atribuindo os valores das variáveis em cada pixel. Para isso, foram ajustados semivariogramas e depois feita a interpolação dos dados via krigagem ordinária utilizando o modelo exponencial (Figura 5).

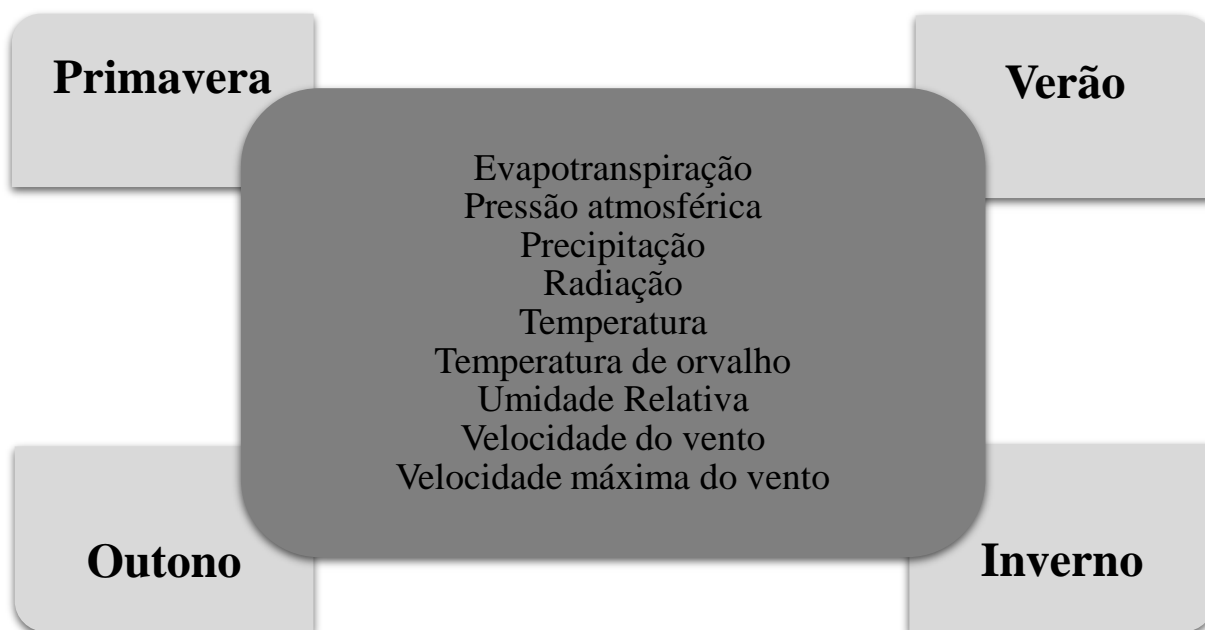
Figura 5 - Exemplificação da interpolação de dados realizada. As imagens correspondem às variáveis para a estação inverno.



Fonte: Do Autor, 2022.

Ao todo, foram considerados 9 fatores climáticos para as 4 estações do ano, totalizando 36 variáveis climáticas (Figura 6).

Figura 6 - Relação das variáveis climáticas utilizadas na modelagem.



Fonte: Do Autor, 2022.

Modelagem

Ao todo foram pré-selecionadas 69 variáveis, sendo elas de clima, de terreno e espectrais. Para otimizar a modelagem, foi realizada uma análise de correlação entre as variáveis independentes e a variável Produtividade, através do coeficiente de correlação de Pearson. Assim, foram selecionadas as variáveis que apresentaram correlação acima de $\pm 0,20$. Para a obtenção do modelo final, utilizamos o *software* RStudio para o processamento. Inicialmente, foi gerado um modelo linear para cada variável de correlação acima de $\pm 0,20$ para análise dos valores coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}) individuais. Posteriormente foi gerado um modelo global contendo todas as variáveis com correlação acima de $\pm 0,20$, e logo após foram obtidos os 5 melhores modelos possíveis com as variáveis de correlação acima de $\pm 0,20$, a partir da função *dredge* do pacote MuMIn (Barton, 2018) que cria todos os modelos possíveis utilizando todas as combinações de variáveis dependentes a partir do modelo global, permitindo visualizar como os diferentes modelos se comparam entre si, selecionando aqueles com melhor desempenho preditivo.

A regra para ranquear os modelos foi de acordo com o Bayesian information criterion (BIC) proposto por Schwarz em 1978. Esse critério de seleção é uma das ferramentas mais utilizada na seleção de um modelo estatístico, por apresentar uma simplicidade computacional e uma performance efetiva em vários tipos de estruturas de modelos (NEATH; CAVANAUGH, 2012). O BIC como hipótese a existência de um “modelo verdadeiro”, o que apresenta o menor valor BIC, que descreve a relação entre a variável dependente e as diversas variáveis explanatórias entre os vários modelos sob seleção. Assim o critério é definido como a estatística que maximiza a probabilidade de se identificar o verdadeiro modelo dentre os avaliados (ANDRÉ; REGAZZI, [s.d.]).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados da correlação de Pearson, encontramos dez variáveis preditoras com valores de correlação acima de $|0,20|$. Classificando esses valores, temos correlações fracas ($< |0,3|$) e moderadas ($|0,3| < |0,5|$). Os valores de R^2 e R^2_{ajus} dos modelos lineares individuais gerados variam entre que 0,11 e - 0,01, valores esses consideravelmente baixos, mostrando que individualmente as variáveis não são capazes de explicar a produtividade (Tabela 3).

Tabela 3 - Variáveis preditoras com seus respectivos valores de correlação, R^2 e R^2_{ajus} .

Variável	Correlação	R^2	R^2_{ajus}
B2s ¹	-0,3156	0,0994	0,0394
B3s ²	-0,3141	0,0974	0,0372
NDVIs ³	0,2133	0,0454	-0,0183
NDWIs ⁴	-0,3320	0,1098	0,0550
B2u ⁵	-0,2254	0,0498	-0,0136
B3u ⁶	-0,2989	0,0908	0,0301
B8u ⁷	-0,2732	0,0746	0,0129
PLC ⁸	-0,2713	0,0736	0,0119
VD ⁹	-0,2600	0,0676	0,0054
PRC ¹⁰	-0,2734	0,0748	0,0131

1 = Banda 2 época seca; 2 = banda 3 época seca; 3 = NDVI época seca; 4 = NDWI época seca; 5 = Banda 2 época úmida; 6 = Banda 3 época úmida; 7 = Banda 8 época úmida; 8 = Plan Curvature; 9 = Valley Depth; 10 = Profile Curvature

Fonte: Do Autor, 2022.

Para o modelo linear global (Equação 1), utilizando todas as variáveis, tivemos um aumento nos valores de R^2 e R^2_{ajus} , que foram 0,75 e 0,34 respectivamente.

Equação 1:

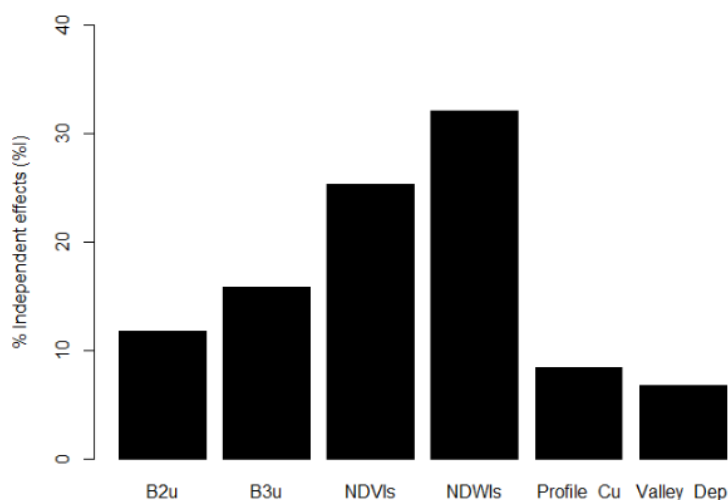
$$\begin{aligned} \text{Produtividade} = & - 6365000 + 208500.B2s + 22760000.B3s - 12280000.NDVIs - \\ & 22170000.NDWIs + 67210000.B2u - 68740000.B3u + 1978000.B8u - 0,02034.PLC - 3919.VD \\ & - 0,02354.PRC \end{aligned}$$

Utilizando o critério BIC, foram obtidos os 5 melhores modelos (Tabela 4). Foram eles:

Tabela 4 - Seleção de modelos para a predição da produção cafeeira nos campos das vertentes utilizando dados de sensores remotos, climáticos e de terreno, com base no Bayesian information criterion.

Modelo	Int.	B2u	B3s	B3u	B8u	NDVIs	NDWIs	Prf_Crv	Vll_Dep	R ²	BIC	▲BIC
1	-2108000			-15940000	-7062000	10820000	-17790000			0,60	448,1	0,00
2	-3131000	49340000		-60220000		-10730000	-18010000			0,60	448,2	0,11
3	-2932000	69530000		-66730000		-11390000	-18150000	-0,03061	-3080	0,71	448,4	0,28
4	-3636000				-6026000	-11340000	-18580000		-2882	0,58	449,0	0,86
5	-7866000		27330000	-23160000		-12030000	-23540000		-2932	0,58	449,1	1,01

De acordo com o *Bayesian Information Criterion*, o modelo ‘real’ é o que apresenta o menor valor BIC, sendo então o modelo (1), mas como regra de utilização e comparação dos modelos obtidos, quando o delta entre os modelos é menor que 2, estabelece que não existe diferença significativa entre os mesmos (Schwarz, 1978). Sendo assim, como todos os modelos apresentam essa característica, ficamos livres para adotar o melhor modelo como sendo o modelo (3), que apresentou os valores $R^2 = 0,71$ e $R^2_{ajus} = 0,54$. Para o modelo selecionado, foi determinado, através da função `hier.part` no RStudio, o efeito de cada variável independente na modelagem final. Essa função define o particionamento das contribuições independentes e conjuntas de cada variável em um conjunto de dados multivariado. As variáveis que mais afetam o modelo, ou seja, as variáveis mais importantes na modelagem da produção foram NDWIs e NDVIs, afetando o modelo em 32,08% e 25,28%, respectivamente. A distribuição restante é B3u (15,8%), B2u (11,69%), Profile Curvature (8,38%) e Valley Depth (6,78%) (Figura 7). Figura 7 - Importância de cada variável na modelagem da produção, em porcentagem.



Fonte: Do Autor, 2022.

Índices de vegetação já haviam sido estudados e correlacionados com a produtividade e produção de plantios de café. Em 2018, Nogueira et al. estudaram a correlação entre a produtividade de plantios de café e índices de vegetação, com e sem correção topográfica para os anos 2013/2014 e 2014/2015. Além disso, outros fatores foram considerados, como direção da plantação, espaço temporal no ano e idade da

planta. Foi determinado que as melhores fases fenológicas para determinar a produtividade com os índices foram as fases de dormência e floração. O NDVI sem e com correção topográfica apresentou correlação com a produtividade nessas duas fases, variando o R^2 de 62% e 89% para a fase de dormência e R^2 de 58% e 73% para a fase de floração.

Castro (2019) também mostra que os índices de vegetação alcançam altos níveis de precisão em várias estimativas relacionadas à plantios de café. O trabalho avaliou índices de vegetação calculados através do processamento computacional de imagens obtidas pelos satélites Landsat-8 e Sentinel-2, com o objetivo de monitorar o estado de saúde e desenvolvimento fenológico de plantios de café, localizados na América Central. Como resultado, o estudo apresenta alta correlação e precisão dos índices de vegetação em estimativas de produtividade, avaliação nutricional, detecção de doenças e pragas, monitoramento da temperatura local, e avaliação de estresse hídricos em pontos específicos dos plantios (CASTRO, 2019). A boa correlação do NDVI com a detecção de estresses hídricos é explicada pelo efeito direto da sazonalidade no índice de área foliar (BERNARDES et al., 2012). Em épocas chuvosas o café apresenta o maior desenvolvimento das plantas e resultam em plantas mais verdes e na formação de frutos. Nesta fase, o café chega aos maiores valores de NDVI, correspondendo ao padrão de maior altura de planta e maior índice de área foliar (IAF). Em contraste, é na estação seca encontramos os menores valores de NDVI nos plantios, devido a redução do IAF causado pela falta de chuvas (NOGUEIRA; MOREIRA; VOLPATO, 2018). A detecção de enfermidade e de problemas nutricionais nos plantios é explicada pela lesão que ocorre nas folhas. O dano causado nas folhas, sejam elas jovens ou já velhas, ocasionam perda de biomassa, afetando o IAF e diminuindo os valores de NDVI. O principal problema dessa correlação ocorre quando a detecção de doenças é realizada em épocas chuvosas, quando o IAF e os valores de NDVI se mostram altos (CASTRO, 2019). Para nosso estudo, a grande influência do NDVIs (época seca) no modelo final é condizente com os resultados de outros estudos, uma vez que é na época seca que pode ocorrer déficits hídricos, afetando negativamente o desenvolvimento e formação do café e, conseqüentemente, na produtividade dos plantios, sendo, portanto, uma variável que possa explicar e determinar este fator limitante.

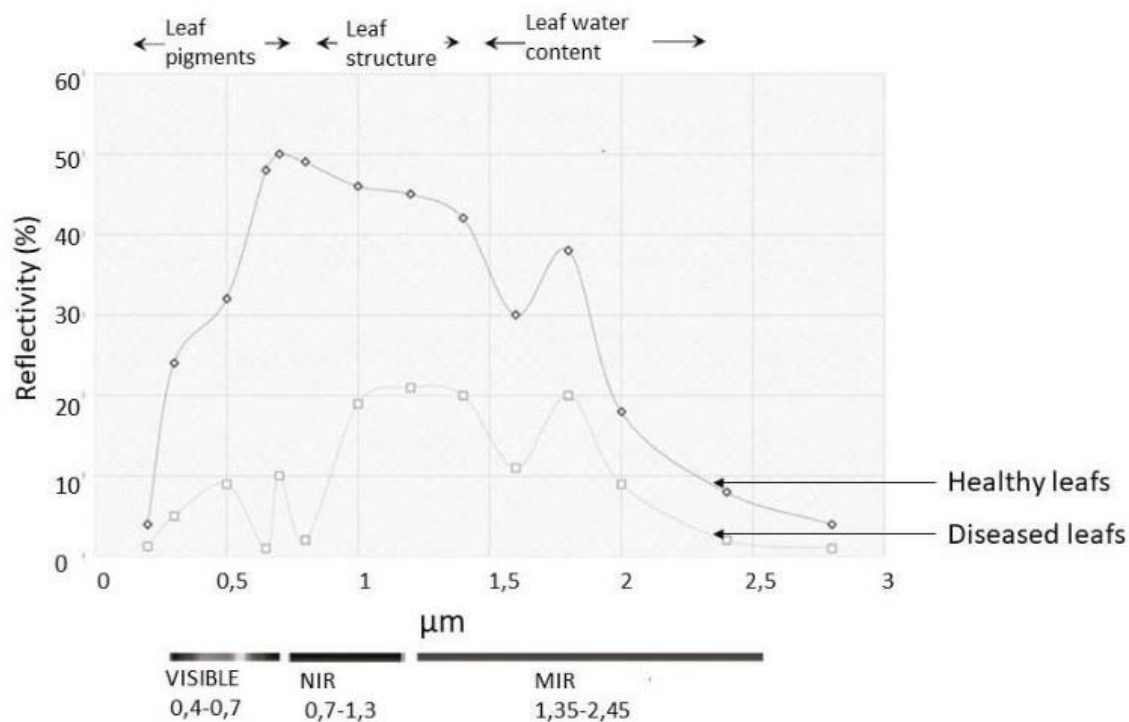
O índice NDWI, que mensura as moléculas de água líquida em copas vegetais que interagem com a radiação solar recebida, é frequentemente associado na determinação de estresses hídricos, fator limitante que pode causar perdas significativas na produtividade

do café (SHASHIKANT et al., 2021). No estudo de Nogueira et. al, o NDWI foi o que melhor apresentou correlação com a produtividade, com um coeficiente de determinação (R^2) variando entre 70% e 89% (NOGUEIRA; MOREIRA; VOLPATO, 2018b). Resultados similares sobre o NDWI já foram apresentados por Cerasoli et. al (2018). O estudo visou estimar a produtividade primária bruta (PPB) de pastagens mediterrâneas sob diferentes regimes de fertilização usando índices de vegetação e reflectância espectral. Na realização de regressões lineares entre a (PPB) e os índices de vegetação, o NDWI foi o índice que explicou a maior proporção da variabilidade da variável dependente (CERASOLI et al., 2018).

Em análise da correlação do café com as bandas espectrais, estudos mostram que plantios saudáveis apresentam correlação positiva com a banda do azul (B2) e do vermelho, mostrando picos de reflectância de luz nessas regiões (Figura 8). Esse comportamento ocorre devido aos pigmentos fotossintéticos como cloroplastos como clorofila, xantofila e carotenos e também devido à quantidade de água armazenada nas folhas (GONZÁLEZ; GÓMEZ; AMAYA, 2017). Ainda analisando o gráfico de reflectância, nota-se que a região espectral do verde (B3) também apresenta valores altos e significativos em folhas saudáveis. Além disso, a banda do verde também apresenta boa correlação com a biomassa do café, auxiliando na estimativa de biomassa seca e úmidas de plantios (PEREIRA COLTRI et al., 2013). Em 2009, Fortes et. al., propuseram uma metodologia para estimar a produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar por dados espectrais do sensor orbital LANDSAT 7. Modelos de regressão foram criados a partir da utilização das bandas espectrais e de índices de vegetação. Assim como em nosso estudo, o modelo final para a produtividade contou com a banda do azul (B2) e do verde (B3).

Os autores definem que a produtividade de uma cultura como o produto da energia solar absorvida no decorrer do estágio de desenvolvimento e a eficiência com que essa energia é transformada em biomassa, e é a banda do azul (B2) que contempla a absorção da energia solar pelos pigmentos fotossintéticos. E na banda do verde (B3) temos um comportamento espectral de reflectância da energia solar pelas folhas, comportamento esse que atribui a cor verde das mesmas, explicando a boa correlação com a quantidade de biomassa produzida pelas plantas (FORTES; DEMATTÊ; GENUÍ, 2009).

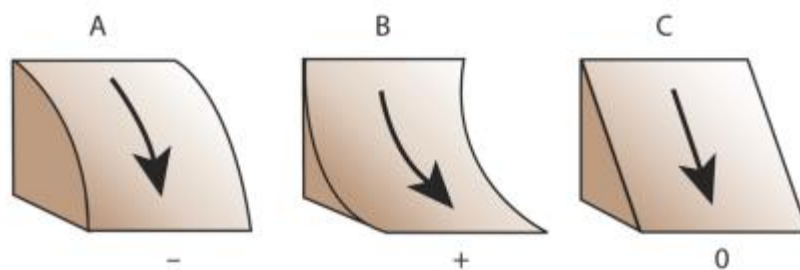
Figura 8 - Reflectância em folhas de café.



Fonte: GONZÁLEZ; GÓMEZ; AMAYA, 2017.

O índice Profile Curvature ou, traduzindo, curvatura do perfil acompanha a declividade, mas fornece informações sobre inclinação da superfície na direção da declividade. Afeta a aceleração e desaceleração do fluxo através da superfície. Um valor negativo (A) indica que a superfície é para cima convexa naquela célula, e o fluxo será desacelerado. Um perfil positivo (B) indica que a superfície é para cima côncava naquela célula, e o fluxo será acelerado. Um valor de zero indica que a superfície é linear (C) (Figura 9) Uma curvatura convexa está associada à erosão do solo e uma curvatura côncava está associada à deposição de água e nutrientes, facilitando o crescimento de plantas (ZEVENBERGEN; THORNE, 1987).

Figura 9 - Curvatura do Perfil.



Fonte: Curvature function | ArcGIS for Desktop, 2022.

A topografia pode afetar o rendimento das culturas através da redistribuição de partículas do solo, matéria orgânica e nutrientes do solo, resultando em propriedades físicas e químicas em diferentes posições topográficas. Características topográficas como elevação, inclinação e curvatura têm um efeito direto na disponibilidade, infiltração e escoamento através de sua influência na superfície e no fluxo de água subsuperficial (HANNA; HARLAN; LEWIS, 1982). Apesar dessa influência, pouquíssimos estudos realizados até a atualidade mostram a curvatura do perfil como uma boa variável capaz de prever características quantitativas e qualitativas de culturas agrícolas. Em 2003, Kaspar et. al., analisaram a relação entre atributos do terreno e rendimentos de 6 anos de plantios de milho. Um modelo de regressão linear múltiplo baseado nas variáveis elevação, declividade e curvatura foi desenvolvido, predizendo 78% da variabilidade existente nas médias de rendimentos de 5 dos 6 anos analisados. É importante frisar que o modelo apresentou boa correlação para os anos que tiveram períodos secos mais expressivos (KASPAR et al., 2003).

O índice Valley Depth ou, traduzindo, profundidade do vale é caracterizado por ser um Modelo de elevação digital “invertido”, calculando a distância vertical entre as redes de drenagens dos vales até o cume. Assim como o profile Curvature, pouquíssimos estudos foram capazes correlacionar o índice Valley Depth com estimativas de produtividade ou qualquer outra característica quantitativa ou qualitativa na agricultura. Em 2020, Matcham et al. utilizaram propriedades de solo e terreno para prever taxas de semeaduras de soja em diferentes locais. De uma maneira geral, as variáveis de terreno influenciaram as taxas de semeadura de uma maneira mais significativa do que as características do solo. Os índices Valley Depth e General Curvature ficaram entre as 5 variáveis que mais influenciaram o modelo preditor da taxa de semeadura. De acordo com os autores, o índice se apresentou localmente mais descritivo porque considera redes de drenagem, sendo assim, relacionado com a disponibilidade de água para os plantios (MATCHAM et al., 2020). Além de influenciar a disponibilidade de água, o índice Valley Depth é considerado uma das variáveis determinantes para tipos de solo. De acordo com Abdel-Lader (2011) em seu estudo de mapeamento digital do solo através de uma regressão logística multinomial, o índice se apresenta como um dos parâmetros que influencia a distribuição espacial das classes de solo. O índice Valley Depth, assim como os outros parâmetros selecionados, apresenta relações conhecidas entre fatores formadores de solo, forma de terra e distribuição do solo, e relacionam também a

distribuição do solo a processos de erosão em áreas íngremes com a dinâmica de movimento e acúmulo da água nas áreas de baixa depressão (ABDEL-KADER, 2011).

Ao contrário do esperado, mesmo a vegetação e, em específico, o café, sendo muito influenciado por fatores climáticos e geomorfométricos, não obtivemos influências significativas desses fatores em nossa modelagem de produtividade. De um modo geral, apesar do Campo das Vertentes apresentar uma área expressiva de 864.523 hectares, as variáveis climáticas se mostraram muito homogêneas, uma vez que a região é predominantemente dominada por um mesmo tipo de clima. E mesmo obtendo dados de 18 estações climatológicas diferentes e separando os mesmos em nas estações primavera, verão, outono e inverno, as médias climáticas da região se mostram pouco variável, não apresentando assim uma forte correlação para explicar os diferentes valores da variável produtividade. Já na análise das influências geomorfométricas, a não influência significativa das variáveis é explicada pela ‘perda’ de informação, uma vez que foi necessário utilizar médias por municípios, não captando assim a verdadeira variabilidade geomorfométrica nos plantios de café. Ambos fatores foram afetados pela escala dos dados utilizados. Teoria essa comprovada por Siefert et.al., (2012) que analisou a dependência espacial entre vegetação e ambiente. Em suas análises, os autores mostram que fatores climáticos apresentam maior significância e relação com a vegetação em escalas maiores, onde ocorre maior heterogeneidade das variáveis e para os fatores edáficos e geomorfométricos, a significância e relação como a vegetação se mostra maior com melhores escalas, que capturam mais os detalhes e variações do terreno (SIEFERT et al., 2012).

CONCLUSÕES

Conclui-se que foi possível correlacionar e estimar a produtividade cafeeira dos municípios da região Campo das Vertentes a partir de variáveis bioclimáticas, espectrais e geomorfométricas. A correlação de Pearson permitiu pré-selecionarmos as variáveis que posteriormente compuseram o modelo de regressão linear global e o modelo de regressão linear final. Para o modelo de regressão linear final, as variáveis que melhor se adequaram, elevando os parâmetros R^2 e R^2_{ajus} , foram: NDWIs; NDVIs; B3u; B2u; Profile Curvature; e Valley Depth. Atentando que, apesar da escala municipal dos dados utilizados, obtivemos resultados satisfatórios, é esperado que a metodologia apresente resultados ainda melhores utilizado uma base de dados maior e mais detalhada. Considerando também que a presença de algumas variáveis no modelo final não é bem explicada pela literatura, é incentivada a continuidade em estudos similares, para melhor entendimento das relações existentes entre o café e variáveis climáticas, espectrais e geomorfométricas.

REFERÊNCIAS

BARONE, M. **Cafés especiais e salto de escala: Análise do circuito espacial produtivo e dos círculos de cooperação dos cafés especiais no sul de Minas Gerais**. 2017.

Huete, A. R. Soil influence in remote sensed vegetation-canopy spectral. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**, Wiley-Interscience, New York (1987), pp. 107-141. 1997.

ABDEL-KADER, F. H. Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 14, n. 1, p. 29–40, 1 jun. 2011.

BERNARDES, T. et al. Monitoring Biennial Bearing Effect on Coffee Yield Using MODIS Remote Sensing Imagery. **Remote Sensing 2012, Vol. 4, Pages 2492-2509**, v. 4, n. 9, p. 2492–2509, 27 ago. 2012.

CASTRO, R. Remote monitoring of coffee cultivation through computational processing of satellite images. **Proceedings - 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2019**, p. 13–18, 1 out. 2019.

CERASOLI, S. et al. On estimating the gross primary productivity of Mediterranean grasslands under different fertilization regimes using vegetation indices and hyperspectral reflectance. **Biogeosciences**, v. 15, n. 17, p. 5455–5471, 14 set. 2018.

COLTRI, P. P. et al. Empirical models to predict LAI and aboveground biomass of *Coffea arabica* under full sun and shaded plantation: a case study of South of Minas Gerais, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 89, n. 4, p. 621–636, 2013.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira 2020**. Brasília:

Curvature function | ArcGIS for Desktop. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>>. Acesso em: 16 maio. 2022.

FORTES, C.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENUÍ, A. M. Estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar por dados espectrais orbitais ETM+/LANDSAT 7 <p>Sugarcarne agroindustrial yield forecast by orbital sensor ETM+/LANDSAT 7 data. **AMBIÊNCIA**, v. 5, n. 3, p. 489–504, 23 dez. 2009.

Gao, B.C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote sensing of environment**, 58(3), pp.257-266, 1996.

GONZÁLEZ, F. A.; GÓMEZ, J. J.; AMAYA, D. F. Multispectral image processing in coffee and cocoa crops. **Revista CINTEX**, v. 22, n. 2, p. 51–67, 30 dez. 2017.

HANNA, A. Y.; HARLAN, P. W.; LEWIS, D. T. Soil Available Water as Influenced by Landscape Position and Aspect1. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 6, p. 999–1004, 1 nov. 1982.

Huete, A. R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment** 25, no. 3 (1988): 295-309.

INFLUÊNCIAS NO PREÇO – Centro do Comércio de Café do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://cccmg.com.br/influencias-no-preco/>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

KASPAR, T. C. et al. Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. **Precision Agriculture** 2003 4:1, v. 4, n. 1, p. 87–101, mar. 2003.

ANDRÉ, C. M. G.; REGAZZI, A. J. **Critérios para seleção de modelos baseados na razão de verossimilhança.** Disponível em: <<http://arquivo.ufv.br/dbg/resumos2008b/Resumo%20Claudomiro.htm>>. Acesso em: 2 mar. 2022.

MATCHAM, E. G. et al. Soil and terrain properties that predict differences in local ideal seeding rate for soybean. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 3, p. 1981–1991, 1 maio 2020.

MOREIRA, M. A. et al. Geotecnologias para mapear lavouras de café nos estados de minas gerais e são paulo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1123–1135, 2010.

NEATH, A. A.; CAVANAUGH, J. E. The Bayesian information criterion: background, derivation, and applications. **WIRES Comput Stat**, v. 4, p. 199–203, 2012.

NOGUEIRA, S. M. C.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L. Relationship between coffee crop productivity and vegetation indexes derived from oli / landsat-8 sensor data with and without topographic correction. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 3, p. 387–394, 1 maio 2018.

REICHMAN, D. R. Big Coffee in Brazil: Historical Origins and Implications for Anthropological Political Economy. **The Journal of Latin American and Caribbean Anthropology**, v. 23, n. 2, p. 241–261, 1 jul. 2018.

Rouse Jr, et. al., **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. No. NASA-CR-132982. 1973.

SHASHIKANT, V. et al. Utilizing TVDI and NDWI to Classify Severity of Agricultural Drought in Chuping, Malaysia. **Agronomy 2021, Vol. 11, Page 1243**, v. 11, n. 6, p. 1243, 19 jun. 2021.

SIEFERT, A. et al. Scale dependence of vegetation-environment relationships: A meta-analysis of multivariate data. **Journal od Vegetation Science**, p. 942 – 951, v. 23, n. 5, 2012

VALE, A. R. DO; CALDERANO, R. A. P.; FAGUNDES, F. N. The Coffee Production in Minas Gerais: comparative study between regions Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba and South/Southwest. **CAMPO-TERRITÓRIO: revista de geografia agrária**, n. Edição especial do XXI ENGA-2012, p. 1–23, 2014.

VEGRO, C. L. R.; DE ALMEIDA, L. F. **Global coffee market: Socio-economic and cultural dynamics**. Elsevier Inc., 2019.

ZEVENBERGEN, L. R.; THORNE, C. R., Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, p. 47 – 56, 1987.