

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E INFORMAÇÕES  
GEOESPACIAIS

JORGE EDUARDO FERREIRA CUNHA

Modelo de estimativa da produtividade de cafeeiros no Cerrado com base em métricas da  
paisagem

Monte Carmelo

2022

JORGE EDUARDO FERREIRA CUNHA

Modelo de estimativa da produtividade de cafeeiros no Cerrado com base em métricas da paisagem

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Agricultura e Informações Geoespaciais.

Área de concentração: Agricultura e Informações Geoespaciais

Orientador: João Vitor Meza Bravo

Monte Carmelo

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C972 Cunha, Jorge Eduardo Ferreira, 1988-  
2022 Modelo de estimativa da produtividade de cafeeiros no  
Cerrado com base em métricas da paisagem [recurso  
eletrônico] / Jorge Eduardo Ferreira Cunha. - 2022.

Orientador: João Vitor Meza Bravo.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Agricultura e Informações  
Geoespaciais.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.141>

Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. Bravo, João Vitor Meza, 1989-,  
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-  
graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais.  
III. Título.



## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agricultura e Informações Geoespaciais				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico				
Data:	24/02/2022	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	32012AIG018				
Nome do Discente:	Jorge Eduardo Ferreira Cunha				
Título do Trabalho:	Modelo de estimativa da produtividade de cafeeiros no Cerrado com base em métricas da paisagem				
Área de concentração:	Informações geoespaciais e tecnologias aplicadas à produção agrícola				
Linha de pesquisa:	Desenvolvimento e aplicações de métodos em informações geoespaciais				

Reuniu-se na sala virtual <https://conferenciaweb.rnp.br/webconf/joao-vitor-meza-bravo> a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, assim composta: Dr. Eusímio Felisbino Fraga Junior (UFU), Dra. Silvana Philippi Camboim (Universidade Federal do Paraná), Dr. João Vitor Meza Bravo (UFU) – orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. João Vitor Meza Bravo, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado com Louvor.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

---



Documento assinado eletronicamente por **João Vitor Meza Bravo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/02/2022, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Silvana Philippi Camboim, Usuário Externo**, em 24/02/2022, às 13:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Eusímio Felisbino Fraga Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/02/2022, às 13:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3397876** e o código CRC **41E8568D**.

---

Dedico este trabalho à minha esposa Cristina e  
meu filho Rafael.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador João Vitor Meza Bravo o incentivo, motivação e orientação nesta caminhada acadêmica;

À Universidade Federal de Uberlândia, e especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais pelo espaço e conhecimento concedidos;

Aos meus pais e irmãos o apoio que me foi dado durante toda a minha trajetória até então;

Especialmente a meu pai Roberto, companheiro de profissão e incentivador de meus estudos;

À minha esposa Cristina, pelo apoio e compreensão;

E principalmente a Deus, por tudo acima colocado.

"Planta a canção do amor nos teus canteiros  
e cuida com a paixão dos jardineiros,  
pois só quem ama colhe a eternidade!"  
(NATHAN de CASTRO)



## RESUMO

Neste estudo associamos os níveis de fragilidade ambiental (FA) de áreas amplamente ocupadas por cafeicultura com os índices de produtividade das lavouras. Usamos como estudo de caso a bacia do Córrego Feio, em Patrocínio. Mapeamos a fragilidade ambiental da bacia do córrego nos anos de 2016 a 2019 a partir do método de Ross (1994), com nossas adaptações. Com base nas observações da FA e da produtividade de sacas de café beneficiadas por hectare de uma área de estudo, criamos um modelo para a estimativa do potencial produtivo de lavouras cafeeiras e o testamos na bacia do Córrego Feio; repetimos o experimento em uma região externa à área de estudo para validar a aplicabilidade do modelo preditivo que criamos. Nesta região externa, comparamos os níveis de produtividade preditos pelo modelo com FA e os dados históricos, de observação de campo, das áreas cafeeiras para os anos de 2016, 2018 e 2020. O modelo adaptado para predição de potencial produtivo mostrou alta correlação no teste de regressão ( $R^2$  médio = 0,9). Na etapa posterior, aplicamos o modelo preditivo em uma área dentro da bacia do Córrego Feio, cujos dados históricos de produtividade também nos foram disponibilizados. Até aqui conseguimos diagnosticar que a bacia do Córrego Feio é heterogênea quanto aos níveis de fragilidade ambiental e há alguma associação com o uso e ocupação do solo. Destarte, a bacia do Córrego Feio possui áreas de maior fragilidade em sua porção central, ocupadas principalmente por campos cerrados ou atividades de alto impacto ambiental, como pastagens degradadas e sistema convencional de plantio. Já as áreas de baixa fragilidade ambiental são majoritariamente ocupadas por cafeicultura; porém existe uma tendência de substituição por sistema de cultivos anuais, o que é perigoso para a conservação e, conseqüentemente, para a produção cafeeira da região. Com os resultados da associação destes níveis de fragilidade com os níveis produtivos do cafeeiro, mostramos que existe uma relação inversamente proporcional, onde quanto maior a fragilidade ambiental de uma área, menor o seu potencial produtivo. O uso da FA como métrica de apoio à tomada de decisão no cultivo do café reforça a importância da conservação da natureza, incentivando práticas sustentáveis do uso dos recursos naturais e do planejamento da ocupação.

**Palavras-chave:** Fragilidade Ambiental. Produtividade. Cafeicultura. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

In this study we studied the levels of Environmental Fragility (EF) of areas occupied by coffee agriculture, associating the crop productivity indexes. We used as a case study the Feio River basin, in Patrocínio. We mapped the EF of the Feio River basin from the year of 2016 thru 2019 using an adapted from our reserves methos based from Ross (1994). Based on EF and yield observations, we created a model to estimate the yield potential of coffee plants tested in the Feio River basin; we repeated the experiment in a region outside the study area to validate the applicability of the predictive model we created. In this outer region, it compares predicted yield levels with historical EF and historical data and average data for the years of 2016, 2018 and 2020. The model adapted for predicting yield potential showed high correlation in the regression test (mean  $R^2 = 0.9$ ). In the nearby pre-installations, we applied the model in an area of Feio Stream, within the nearby areas, they were also included in the productivity in the available data. Thus, the Feio River basin has areas of greater fragility in its central portion, mainly occupied by savannah fields or activities with a high environmental impact, such as degraded pastures and conventional planting systems. The areas of low environmental fragility are mostly occupied by coffee growing; however, there is a tendency to replace it with a no-tillage system (soybean), which is dangerous for conservation and, consequently, for the productivity of coffee plantations. With the results of the association of these levels of fragility with the productive levels of coffee, we show that there is an inversely proportional relationship, where the greater the environmental fragility of an area, the lower its productive potential. The use of decision support metrics in coffee farming enhances the importance of nature conservation, encouraging the use of natural resources in the occupation.

**Keywords:** Environmental Fragility. Productivity. Coffee growing. Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURA 1</b>	Fluxograma Geral da ordem de desenvolvimento da dissertação.....	16
<b>CAPÍTULO 1</b>		
<b>FIGURA 1</b>	Contexto de Localização da bacia do Córrego Feio, Patrocínio, Minas Gerais.....	23
<b>FIGURA 2</b>	Diferentes níveis de uso do solo na bacia.....	24
<b>FIGURA 3</b>	Pato Mergulhão.....	25
<b>FIGURA 4</b>	Processos para obtenção dos níveis de Fragilidade Ambiental e sua análise.....	26
<b>FIGURA 5</b>	Processo para análise temporal do índice NDVI para áreas de interesse.....	31
<b>FIGURA 6</b>	Evolução temporal da área (hectares) ocupada por cada classe de uso e ocupação ao longo de 4 anos.	33
<b>FIGURA 7</b>	Evolução temporal de uso e ocupação de 2017 a 2020.....	33
<b>FIGURA 8</b>	Fragilidade Ambiental Potencial e zonas definidas pelas Ordens de Solos.....	34
<b>FIGURA 9</b>	Área de pastagem em recuperação cercada por áreas de conservação em local de alta declividade próximo ao Córrego Feio.....	35
<b>FIGURA 10</b>	Área de alta declividade ocupada por atividade de alto impacto (silagem) próxima ao leito principal do Córrego Feio.....	37
<b>FIGURA 11</b>	Mapa de Fragilidade por uso e ocupação seguido do Mapa de Fragilidade Ambiental Emergente (ano de 2020).....	39
<b>FIGURA 12</b>	Médias de NDVI de acordo com o vetor de extração	40
<b>FIGURA 13</b>	APP do Córrego Feio.....	41
<hr/>		
<b>CAPÍTULO 2</b>		
<b>FIGURA 1</b>	Localização da área de estudo e detalhe dos talhões de lavouras cafeeiras.....	47

<b>FIGURA 2</b>	Plantio de café consorciado a <i>Urochloa ruziziensis</i> em ano de pós-poda (safra 0) na área 2002.....	48
<b>FIGURA 3</b>	Fluxograma de processos metodológicos do modelo proposto....	50
<b>FIGURA 4</b>	Valores de R <sup>2</sup> multiplicados por 100 (percentual) e RMSE para os 3 modelos de comparação nos 3 anos distintos.....	55
<b>FIGURA 5</b>	Gráficos das análises de regressão entre produtividade real e potencial calculado para os 3 anos de estudo.....	57
<b>FIGURA 6</b>	Mapas de classes das variáveis utilizadas e do nível de Potencial Produtivo de acordo com a Topografia (FatorT) para as áreas A e B.....	58
<b>FIGURA 7</b>	Mapas de classes das variáveis utilizadas e do nível de Potencial Produtivo de acordo com a Topografia (Fator T) para as áreas C, D, E, F e G.....	59
<b>FIGURA 8</b>	Mapas de potencial produtivo final dos talhões A e B.....	61
<b>FIGURA 9</b>	Mapas de potencial produtivo final dos talhões C, D, E, F e G...	61

---

### **CAPÍTULO 3**

<b>FIGURA 1</b>	Contexto de localização da Área de Estudo / Fazendas sobre o mapa de Fragilidade Ambiental Potencial.....	69
<b>FIGURA 2</b>	Fluxograma dos processos utilizados no método.....	71
<b>FIGURA 3</b>	Fator T, NDVI e Potencial Calculado para a Fazenda A conforme hierarquia de produtividade.....	76
<b>FIGURA 4</b>	Visualização do Fator T (A), RGB (B), NDVI (C) e Potencial Calculado (D) para a Fazenda A.....	76
<b>FIGURA 5</b>	Fator T, Potencial Calculado e NDVI para a Fazenda B conforme hierarquia de produtividade.....	77
<b>FIGURA 6</b>	Visualização do Fator T (A), NDVI (B) e Potencial Calculado (C) para a Fazenda B.....	78
<b>FIGURA 7</b>	Fator T, Potencial Calculado e NDVI para a Fazenda C conforme hierarquia de produtividade.....	79
<b>FIGURA 8</b>	Gráfico da Análise de Regressão entre Fator T e Produtividade para a fazenda C.....	79

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

<b>TABELA 1</b>	Categorias hierárquicas de fragilidade ambiental para os fatores declividade, classe de solo, tipo de cobertura vegetal e distância da drenagem.....	29
<b>TABELA 2</b>	Hectares ocupados por cada classe de Fragilidade Ambiental no ano de 2020 em cada uma das zonas definidas.....	36

---

### CAPÍTULO 2

<b>TABELA 1</b>	Categorias hierárquicas para produtividade do cafeeiro em vista dos fatores declividade, poder de fluxo e forma de terreno, adaptados da proposição de Ross (1994).....	51
<b>TABELA 2</b>	Valores de produtividade de café observada absoluta, e média e desvio padrão por ano e talhão.....	56
<b>TABELA 3</b>	Dados para os diferentes parâmetros observados, potencial produtivo estimado e produtividade observada.....	60

---

### CAPÍTULO 3

<b>TABELA 1</b>	Categorias hierárquicas para produtividade do cafeeiro em vista dos fatores declividade, poder de fluxo e forma de terreno, adaptados da proposição de Ross (1994).....	73
-----------------	---	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos.....	14
<b>2</b>	<b>ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO 1 - A DINÂMICA DE OCUPAÇÃO DE ÁREAS FRÁGEIS PELA AGRICULTURA NO CERRADO: UM ESTUDO DE CASO DA BACIA DO CÓRREGO FEIO, MINAS GERAIS, BRASIL .....</b>	<b>17</b>
3.1	Introdução .....	17
3.2	Material e Métodos.....	22
3.2.1	Área de Estudo .....	22
3.2.2	Métodos .....	26
3.2.3	Análise dos resultados .....	31
3.3	Resultados e Discussão .....	32
3.4	Conclusões .....	40
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO 2 - UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO DE CAFEIROS (<i>COFFEA ARABICA L.</i>) BASEADO NA OBSERVAÇÃO DE ELEMENTOS DA PAISAGEM .....</b>	<b>42</b>
4.1	Introdução .....	42
4.2	Material e Métodos.....	45
4.2.1	Área de estudo .....	45
4.2.2	Método.....	48
4.2.3	Análises dos Resultados .....	53
4.3	Resultados e Discussão .....	53
4.4	Conclusões .....	61
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO 3 - MÉTRICA E MODELO DE ASSOCIAÇÃO ENTRE A CONSERVAÇÃO DA NATUREZA E A PRODUTIVIDADE DE LAVOURAS CAFEIIRAS NO CERRADO .....</b>	<b>63</b>
5.1	Introdução .....	63
5.2	Material e Métodos.....	66
5.2.1	Área de Estudo .....	66
5.2.2	Método.....	69
5.2.3	Análise dos resultados .....	73

<b>5.3 Resultados e Discussão .....</b>	<b>74</b>
<b>5.4 Conclusões .....</b>	<b>79</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade de grande importância no cenário econômico brasileiro e precisa estimular a conservação de áreas frágeis, por ser a ocupante da majoritária parte do território nacional antropizado (30,8% do território), incluindo áreas de grande fragilidade ambiental (LOPES DOS SANTOS et al., 2021; SOUZA et al., 2020; SPAROVEK et al., 2010, 2015). Junto à elevada demanda de produção há a obrigação de se ponderar as necessidades sociais e ambientais, estimulando-se a conservação dos recursos naturais do planeta (BLACKBURN; BLACKBURN, 1997; BODIN; CRONA, 2009; COWIE et al., 2018). Essa última condição impõe a necessidade da criação de soluções que permitam a produção de alimentos sem o esgotamento da natureza (CROSSON; ANDERSON, 1994; DE FRAITURE; WICHELNS, 2010; FISCHER; CONNOR, 2018).

A partir disto, é necessário entender quais os episódios dentro da agricultura que levam ao desperdício de recursos naturais (METZGER et al., 2019; NASIR; CANH; LAN LE, 2021) e ao mesmo tempo criar estratégias que procurem mitigar este cenário, estabelecendo sistemas agrícolas de alta produtividade que não danifiquem e desperdicem recursos naturais (KRINTZ et al., 2016; MULLAN; HAQQ-MISRA, 2019; PRETTY, 2008; TRIPATHI et al., 2018). Neste sentido, tem se destacado como estratégia a Agricultura de Precisão, por esta ser uma modalidade onde as variações espaciais e temporais dos fatores ambientais são levados em conta para o manejo das culturas (ZHANG; WANG; WANG, 2002). O uso das técnicas de Agricultura de Precisão resulta na utilização cuidadosa de insumos agrícolas por meio do direcionamento prévio, gerando ganhos quanto à preservação do meio ambiente (GARDEZI; STOCK, 2021).

Pensando no estudo das relações entre a conservação ambiental e a agricultura, o Cerrado brasileiro se destaca como ponto de interesse, por este ser um bioma que sofre grandes perdas de áreas conservadas, principalmente pela agricultura (HUNKE et al., 2015; KLINK et al., 2020; KLINK; MACHADO, 2005; LOPES DOS SANTOS et al., 2021). As perdas de áreas conservadas no Cerrado estão, em grande parte, relacionadas a práticas agrícolas inadequadas que levam a perdas diretas em termos ambientais, pelo desperdício de áreas que poderiam ser utilizadas por atividades de alto rendimento (BRAZ et al., 2013; DE OLIVEIRA et al., 2004; KLINK; MACHADO, 2005; NEPSTAD et al., 2019).

Dentre as principais commodities agrícolas de importância mundial produzidas no Cerrado está o café arábica (*Coffea arabica* L.) (TALBOT, 2011). O café é uma cultura sensível quanto às condições ambientais, principalmente temperatura e disponibilidade hídrica (PETEK;



SERA; FONSECA, 2009). Essa condição implica que seu cultivo seja feito em áreas de condições ambientais específicas e que variações do ambiente, como efeitos do aquecimento global, influenciarão em sua produção (OVALLE-RIVERA et al., 2015; PETEK; SERA; FONSECA, 2009; REAY, [s.d.]; SEDIYAMA et al., 2001). Dessa forma, é necessário entender a relação existente entre os fatores específicos do meio ambiente e a produtividade de lavouras cafeeiras (DE CAMARGO, 2010; SEDIYAMA et al., 2001).

Importante explicar que o Brasil é o maior produtor de café arábica do mundo, com aproximadamente 41,16 milhões de sacas de 60 Kg produzidas por ano, em média realizada entre as safras de 2018 e 2019. Regionalmente, o cerrado mineiro foi responsável por aproximadamente 69% da produção nos dois anos, com média de 28,59 milhões de sacas produzidas por ano (ABIC, 2019).

Dentre os parâmetros capazes de diagnosticar o nível de conservação e/ou fragilidade de uma área está a Fragilidade Ambiental (FA), a qual utilizamos nos estudos aqui presentes conforme adaptações do modelo proposto por Ross (ROSS, 1994). A FA é medida segundo a fragilidade/instabilidade potencial e a fragilidade/instabilidade emergente. A FA potencial considera variáveis de variabilidade espacial determinada naturalmente, em ambientes preservados, tais como solos, relevo e a vegetação nativa. Já a FA emergente considera os fatores da FA potencial junto à interferência antrópica, levando em conta os níveis de dano ambiental causado por cada tipo de atividade (MANFRÉ et al., 2013; ROSS, 1994; RATTCLIFFE, 2012). Desta forma, a valoração da FA permite o direcionamento de atividades de forma a realizar o uso adequado de recursos ambientais, ou mesmo o direcionamento adequado de áreas aptas a determinados níveis de cultivo agrícola, como exemplo a cafeicultura.

A partir do exposto, observa-se a importância da associação entre os níveis de Fragilidade Ambiental no Cerrado e a produção agrícola. As pesquisas que buscam relacionar a conservação da vegetação nativa e a produção agrícola revelam quais as consequências da adoção (ou não) de práticas sustentáveis na agricultura. Adiciona-se importância a essa sorte de estudos quando se trata do bioma mais agricultado, dentro de um dos maiores países de mundo. Nesse sentido, embora as áreas de cultivo no Cerrado sejam destinadas, principalmente, às produções de soja, milho, algodão e pastagem, no Cerrado Mineiro destaca-se a cultura cafeeira, particularmente da espécie *Coffea arabica*, que serve de contexto a este estudo.

Neste trabalho utilizamos três distintos modelos baseados no proposto por Ross (1994) para a fragilidade ambiental para diferentes fins: inicialmente, um modelo para a diagnose da situação de FA potencial/emergente para uma bacia hidrográfica em pauta de estudo, buscando

relacionar os níveis de fragilidade com a dinâmica de uso e ocupação, com foco na dinâmica das áreas agrícolas. Em um segundo momento, outro modelo foi criado visando estimar a safra e o potencial produtivo de áreas voltadas à cafeicultura, em uma área de estudo externa à bacia principal. Por último, uma adaptação próxima do segundo modelo foi criada visando a associação do nível de fragilidade ambiental com a produtividade de cafeeiros dentro da bacia hidrográfica principal.

Com este modelo de estudo, buscamos responder questões relacionadas à existência de relação/associação entre o nível de FA e conservação ambiental, com a produtividade cafeeira. De forma específica, em cada um dos capítulos, buscamos responder uma série de perguntas, postas na sequência:

1. Como se distribui a ocupação agricultura sobre as áreas frágeis e quais as situações alavancam o avanço desta ocupação?
2. É possível criar um modelo que estime a safra cafeeira a partir de parâmetros de Fragilidade Ambiental?
3. É possível identificar e classificar hierarquicamente os fatores que influenciam as propriedades dos solos e relacioná-los a mudanças do potencial de uma área cafeeira quanto à produtividade?
4. Podemos relacionar estes fatores de forma conjunta buscando quantificar este potencial?
5. É possível utilizar de meios do sensoriamento remoto para definir as variações das qualidades vegetativas e estimar o que seria a produtividade de forma dinâmica?
6. De que forma este processo influencia na conservação de áreas de vegetação nativa e melhora no sentido de criar uma cafeicultura mais sustentável?

Finalmente, a pergunta de pesquisa que nos guiou na construção desta dissertação foi delimitada pela seguinte sentença: é possível utilizarmos modelos baseados em métricas e elementos da paisagem com a finalidade de definir aptidão e/ou potencial produtivo de áreas destinadas à cafeicultura?

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral desta dissertação reside em associar métricas da paisagem com o potencial produtivo de cafeeiros, focando em sua utilização como ferramenta de auxílio à valoração produtividade. Especificamente, aqui criamos modelos que possibilitam a estimativa

do potencial produtivo e da produtividade de áreas de lavouras cafeeiras a partir de adaptações do método de Ross (1994), proposto para a investigação da Fragilidade Ambiental.

## 2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi desenvolvida a partir da execução de três manuscritos conforme a sequência apresentada a seguir e ilustrada na Figura 1:

O Capítulo 1 consta do artigo denominado “A dinâmica de ocupação de áreas frágeis pela agricultura no cerrado: Um estudo de caso da bacia do córrego feio, Minas Gerais, Brasil”, que apresenta o diagnóstico ambiental da bacia do Córrego Feio, localizado no município de Patrocínio, Minas Gerais, baseado na variação temporal das leituras de Fragilidade Ambiental (FA), com um modelo por nós adaptado do proposto por Ross (1994) e na variação temporal das respostas espectrais da vegetação. Neste diagnóstico, focamos nas variações temporais de uso e ocupação do solo, levando em conta sua influência na degradação/preservação da bacia hidrográfica. Por esta ser uma bacia altamente agricultada e o foco desta dissertação ser a cafeicultura, o principal foco de discussão é nas alterações ocorridas quanto a esta cultura na bacia. Os resultados são apresentados na forma de estatística descritiva zonal e mapas gerados a partir dos produtos analisados.

No segundo trabalho, presente no Capítulo 2, de nome “Um Modelo Multicritério para Estimativa do Potencial Produtivo de Cafeeiros (*Coffea arabica* L.) baseado na observação de elementos da paisagem” criamos um modelo de estimativa do potencial produtivo/produtividade de lavouras cafeeiras em regime de safra zero a partir de uma adaptação do modelo proposto por Ross (1994) onde criamos as classes conforme o que o estado de arte aponta como ideal para o cafeeiro e conforme a observação empírica do comportamento de determinadas variáveis, sendo elas: Forma de Relevo, Declividade, Poder de Fluxo da Água, Temperatura da superfície e NDVI. O modelo foi aplicado em 3 anos distintos (2016, 2018 e 2020) a uma fazenda composta por 7 talhões no município de Bambuí-MG. Observamos aqui que o modelo criado condiz em grande parte com os níveis de fragilidade ambiental, o que ressalta a ideia de relação entre nível de FA e a produtividade cafeeira. Com este modelo foi possível estimar a safra a partir de modelo de regressão linear com aproximadamente 90% de assertividade para a área de estudo.

No Capítulo 3 “Métrica e Modelo de associação entre a conservação da natureza e a produtividade de lavouras cafeeiras no Cerrado” aplicamos o modelo do Capítulo 2 a diferentes fazendas presentes na bacia do Córrego Feio com o objetivo de assimilar a FA ao nível

produtivo de cafeeiro. A partir da adaptação do modelo do Capítulo 2 à realidade da bacia do Córrego Feio conseguimos hierarquizar a produtividade de diferentes fazendas de forma satisfatória. Observamos que fazendas presentes em área de menor fragilidade tendem a ser menos assertivas à aplicação do modelo e que, assim como no Capítulo 2, os parâmetros de topografia mostram maior correlação com a produtividade do que o índice multiespectral utilizado.

Finalmente, o item 6 desta dissertação (Considerações Finais) relata de forma geral o que pudemos observar e concluir a partir da combinação dos 3 capítulos.

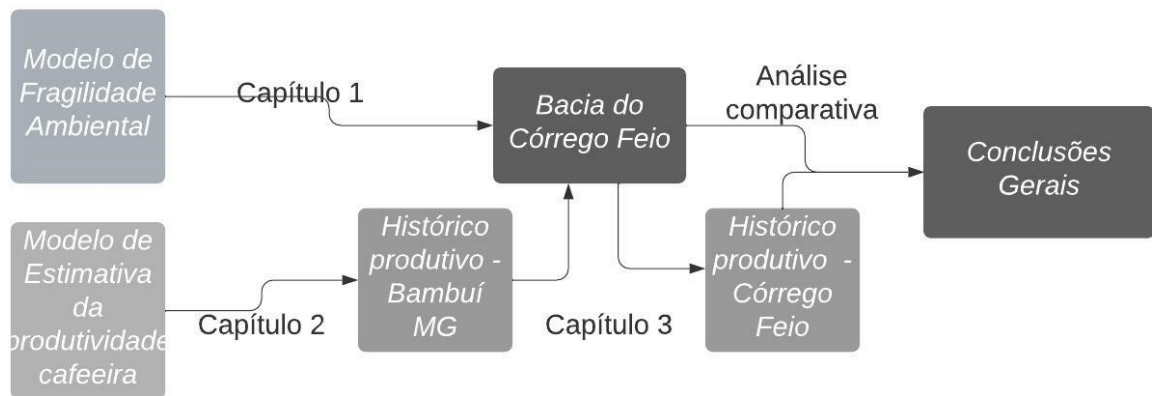


Figura 1. Fluxograma Geral da ordem de desenvolvimento da dissertação.

### **3 CAPÍTULO 1 - A DINÂMICA DE OCUPAÇÃO DE ÁREAS FRÁGEIS PELA AGRICULTURA NO CERRADO: UM ESTUDO DE CASO DA BACIA DO CÓRREGO FEIO, MINAS GERAIS, BRASIL**

#### **RESUMO**

Nos últimos anos o Brasil tem se destacado como antagonista nas políticas de preservação dos recursos naturais. O Cerrado é um dos biomas mais afetados por este retrocesso, pois ocupa zonas de interesse econômico da agropecuária. Ao longo do Cerrado existem projetos que visam estimular a preservação dos recursos naturais, mas não sabemos se estes incentivos têm propiciado, de fato, a conservação. Este é o caso da bacia hidrográfica do Córrego Feio, localizada no cerrado mineiro, próxima à cidade de Patrocínio, Estado de Minas Gerais. A bacia do Córrego Feio tem projetos de conservação que a qualificam como um modelo a ser observado quanto ao funcionamento dos incentivos de proteção ao ambiente do Cerrado. Desse modo, neste artigo explicamos como ocorre o avanço da agricultura sobre as áreas frágeis da bacia do Córrego Feio, quais as situações alavancam este processo e se as estratégias de proteção têm produzido bons resultados. Nossos resultados demonstraram que existe grande heterogeneidade na fragilidade potencial da bacia, sendo que os locais menos frágeis são amplamente utilizados para cafeicultura enquanto os locais mais frágeis variam entre áreas de campos em reservas e atividades de grande impacto, como a monocultura tradicional e a pecuária. Quanto ao uso e ocupação, existe estabilidade temporal com pequena variação no sentido do aumento da área ocupada por Sistema de Plantio Direto em detrimento da cafeicultura e cultivos convencionais. As áreas de APP da bacia tiveram pequena melhoria qualitativa da vegetação ao longo dos 3 anos estudados, enquanto áreas de reservas compostas por campos mostraram processo de degradação natural. São necessárias ações que busquem garantir a preservação da bacia, tendo em vista sua importância, fazendo-se necessário o uso de outras estratégias de incentivo e fiscalização quanto à conservação e restauração ambiental.

#### **3.1 Introdução**

O equilíbrio entre a sociedade e o meio ambiente é de suma importância para a conservação dos recursos naturais (BLACKBURN; BLACKBURN, 1997; BODIN; CRONA, 2009; COWIE et al., 2018). A demanda por soluções aos problemas ambientais tem aumentado ao longo dos últimos anos, principalmente por conta da aceleração das mudanças climáticas e

do desperdício de recursos naturais (CROSSON; ANDERSON, 1994; DE FRAITURE; WICHELNS, 2010; FISCHER; CONNOR, 2018). Nesse cenário, é fundamental que se desenvolva conhecimento sobre os eventos que penalizam os ecossistemas terrestres (KOK et al., 2018; PERIÇATO; SOUZA, 2019; STRAUCH et al., 2019).

Ao longo dos anos, o Brasil se transformou no principal antagonista das políticas de proteção ao meio ambiente (CROUZEILLES et al., 2017; RATTER; RIBEIRO; VALE et al., 2021). Este cenário é consequência de políticas governamentais que facilitam o desmatamento, a ocorrência de incêndios criminosos, a contaminação e diminuição dos recursos hídricos e a ocupação desenfreada de áreas ambientalmente frágeis (ABESSA; FAMÁ; BURUAEM, 2019; VALE et al., 2021). Neste contexto, a agricultura desempenha um papel preponderante, visto que ocupa a vasta maioria do território brasileiro antropizado, em especial, as áreas de fronteira com zonas de alta vulnerabilidade ambiental (LOPES DOS SANTOS et al., 2021; SANTOS et al., 2021; SPAROVEK et al., 2010, 2015).

Desta forma, é necessário desenvolver pesquisas que auxiliem no monitoramento dos episódios de degradação dos recursos naturais, para que se diminua os riscos das mudanças climáticas, falta de água e diminuição da capacidade da produção de alimentos (METZGER et al., 2019; NASIR; CANH; LAN LE, 2021). Nesse contexto, é importante salientar que a sociedade moderna anseia por meios de produção agrícola capazes de saciar as necessidades da população mundial, mediante o uso de tecnologias que aumentem a produtividade e, em simultâneo, não causem danos aos recursos naturais (MULLAN; HAQQ-MISRA, 2019; PRETTY, 2008; TRIPATHI et al., 2018). Isto nos traz à necessidade de implantação de estratégias e tecnologias que possibilitem incremento produtivo de forma sustentável, através do conhecimento e gestão dos recursos disponíveis (KRINTZ et al., 2016).

No Brasil, o bioma Cerrado é um dos que mais sofrem perdas de áreas conservadas, quer seja por atividades agrícolas, quer seja por queimadas, desmatamento ilegal e avanço de áreas urbanas (HUNKE et al., 2015; KLINK et al., 2020; KLINK; MACHADO, 2005; LOPES DOS SANTOS et al., 2021). Importante salientar que o bioma Cerrado contribui com 5% da biodiversidade mundial e 19% do potencial hídrico do Brasil; todavia, apenas 8,1% desse bioma se encontra protegido em Unidades de Conservação (FONSECA; MACHADO; PRADO, 2002; KLINK; MACHADO, 2005; LATRUBESSE et al., 2019). A expansão agrícola e a criação do gado de corte são os principais fatores ligados ao desmatamento das Unidade de Conservação do Cerrado. Junto a isso, as áreas de pastagens são hoje parte majoritária do uso e ocupação do Cerrado, sendo estas muitas vezes degradadas, causando perdas de estoques de carbono e baixa

produtividade (BRAZ et al., 2013; DE OLIVEIRA et al., 2004; KLINK; MACHADO, 2005; NEPSTAD et al., 2019).

Pode-se afirmar que o Cerrado se encontra amplamente desmatado e devem ser criadas políticas que influenciem o melhor aproveitamento de suas áreas, promovendo-se a produção agrícola sustentável (PRETTY, 2008), principalmente, a ampla área composta por pastagens degradadas, como uma estratégia para a conservação de áreas originais do Cerrado (CERRI et al., 2018; LOPES DOS SANTOS et al., 2021). Nesse sentido, é possível afirmar que meio ambiente tende ao equilíbrio ecodinâmico e as ações antropogênicas interferem nesta condição. Como resultado dessas ações humanas, altera-se a condição da fragilidade ambiental de uma determinada região (GIMENES; FILHO, 2013; ROSS, 2012; SCHIAVO et al., 2016). Especificamente, a fragilidade ambiental é uma medida que descreve a susceptibilidade de um ambiente sofrer alterações, conforme operam os vetores humanos e naturais (FRANÇA et al., 2019; MASSA; ROSS, 2012; ROSS, 1994). A valoração da fragilidade ambiental permite que o gestor faça o bom uso dos recursos naturais, sem causar danos exaustivos à dinâmica ecossistêmica local/regional.

A fragilidade ambiental pode ser compreendida através de duas unidades ecodinâmicas principais: a instabilidade/fragilidade potencial e a instabilidade/fragilidade emergente. A fragilidade potencial se refere à tipologia de valoração de fragilidade em que se considera as instabilidades naturais de ambientes preservados, associando-se às características naturalmente presentes; como, por exemplo, o tipo de solo, a inclinação das vertentes, tipo de vegetação e a potencial intervenção antrópica. Em contrapartida, a fragilidade emergente refere-se à medida de instabilidade dinâmica de uma unidade ecodinâmica, a qual se valoriza em uma combinação da fragilidade potencial (características naturais) com a instabilidade causada pela ação humana, a partir do uso dos recursos naturais locais (MANFRÉ et al., 2013; ROSS, 1994). Nesse sentido, o conhecimento do grau de fragilidade ambiental de uma região geográfica pode subsidiar políticas voltadas à produção agrícola, reflorestamento e à mineração (FRANÇA et al., 2019; GÉNIN et al., 2020).

Novamente, através do conhecimento do estado de fragilidade é possível delinear ações de manejo adequadas à proteção fauna e flora local/regional, sem haver severos prejuízos à produção agrícola; evita-se, assim, problemas ambientais de diversos tipos e graus de distúrbio (ARAÚJO COSTA et al., 2019; VALLE JUNIOR et al., 2014). Como efeitos secundários, ao se conhecer a fragilidade ambiental subsidia-se a geração de renda com o turismo ecológico, reduz-se a emissão dos gases do efeito estufa, entre outros benefícios (DE OLIVEIRA et al., 2004; KISS, 2004; ROBALINO; PFAFF, 2013). No contexto do Brasil, especialmente no

bioma Cerrado, valorar a fragilidade ambiental e confrontá-la com as tendências do *land use and land cover* (LULC), pode ser uma alternativa para se prever cenários conflituosos e mitigar problemas futuros, mediante ações planejadas e de impacto positivo (LOHMANN, 2009; MACEDO et al., 2018).

Como afirmado anteriormente, o uso e ocupação agrícola é um dos principais fatores que influenciam na degradação ambiental, e é importante considerar as diferenças no manejo das diferentes culturas, que agridem o meio ambiente de formas distintas (BÉGUÉ et al., 2018; GIRARDIN; BOCKSTALLER; VAN DER WERF, 2000; MCLAUGHLIN; MINEAU, 1995). Importante ao contexto desta pesquisa, o cerrado mineiro é uma região geográfica produtora de diversos produtos agrícolas de grande importância mundial. Embora a região seja notoriamente conhecida por sua grande produção de café, esta cultura não é aquela que ocupa maior espaço na região em termos territoriais. Existe uma grande ocupação de áreas por outras culturas agrícolas, principalmente por culturas de grãos de ciclo anual, como soja, milho, sorgo, trigo e feijão, com maior destaque para áreas de sucessão entre soja e gramíneas (MAPBIOMAS, 2020).

Do ponto de vista conservacionista, a cultura do café tende a ser menos invasiva do que as culturas anuais, pois existe, no caso da cafeicultura, a cobertura do solo durante todo o ano. Em contrapartida, nas culturas anuais existe um período de entressafra, onde o solo se torna mais exposto a fatores de intempérie (CASTRO; NETO, 2009). Junto a isso, os estoques de carbono acumulados por culturas perenes são superiores aos de lavouras sazonais (COX et al., 2006). Adicionalmente, na cafeicultura moderna é de praxe a utilização de um manejo mais racional das entrelinhas do cafeeiro, onde é utilizado o plantio consorciado com culturas de proteção e interesse, ou ainda, a manutenção de plantas daninhas (mato) de forma controlada. Essa prática gera maior proteção do solo e direciona a produção de café para o caminho da sustentabilidade (DA SILVA; GUARNIERI; CARVALHO, 2018).

Quanto as culturas anuais praticadas na região do cerrado mineiro, é interessante ressaltar que existem diferentes sistemas de plantio, os quais são subdivididos conforme a forma com que o terreno é tratado quanto ao seu revolvimento, e, portanto, de forma indireta, classifica sua agressividade ao terreno (ARSHAD, 1999). Dentre os mais utilizados na região estão o plantio convencional, onde há revolvimento do solo com a utilização de maquinários como grades e arados e não há manutenção de restos culturais nas áreas, tornando-as ainda mais frágeis (CASTRO FILHO et al., 1991; SOUTH; QI; LUSCH, 2004). Este sistema de plantio é geralmente utilizado para a produção de milho visando alimentação animal, em processo de silagem, e, conseqüentemente, relacionado à monocultura (GRANT; FERRARETTO, 2018;



SAINJU; SINGH, 2001). Outro sistema amplamente difundido é o Sistema de Plantio Direto, utilizado na maioria das áreas de produção de grãos, principalmente soja e milho, que comumente são plantados em sucessão ou rotação de culturas. Neste sistema é imprescindível o não revolvimento do solo e manutenção de restos culturais (palhada) na área, o que gera um grau de proteção maior, implicando em uma menor fragilidade quando comparada ao sistema convencional de plantio. Além disso, a utilização de culturas variadas em rotação é um fator que ameniza sua agressividade ao ambiente (COUGHENOUR, 2003; DE OLIVEIRA; PAVAN, 1996; DERPSCH, 2003; DERPSCH et al., 2014).

Apesar do Cerrado mineiro ser uma das regiões que mais produzem café no mundo, nos últimos anos, fatores como o déficit hídrico da região, o manejo inadequado de lavouras, o aumento da pressão de pragas e doenças associados ao aumento da pressão pela diminuição do uso de insumos químicos, além da atratividade pelo aumento da lucratividade de outras culturas, levam a modificação do uso do solo destinado à agricultura nessa porção do Brasil (FEARNSIDE, 2001; SAITO, 2008; SANTOS et al., 2021). Aliado a este cenário, muitas vezes as lavouras de café do cerrado mineiro se encontram em estágio de senilidade avançada, o que instiga a rotação com outras culturas, de modo a se diminuir a pressão de pragas e doenças antes da replantagem do cafeeiro. Essas mudanças nas culturas representam risco à conservação dos recursos naturais deste bioma, visto que a substituição tem sido feita para culturas mais agressivas (FERRARO, 2012; SANO et al., 2019).

Outro ponto a ser observado quando comparados os impactos causados entre áreas de produção cafeeira e de grãos é de que existe pressão e uma forte adesão de fazendas cafeeiras ao processo de certificação, o que faz com que estas sejam, por norma, mais sustentáveis dos pontos de vista social, ambiental e econômico, quando comparadas àquelas propriedades nas quais se pratica agricultura de culturas anuais. Importante ressaltar que nas propriedades rurais que produzem culturas anuais o processo de certificação é menos comum, o que as direciona à via oposta das propriedades com cafeeiros (BARRA, 2019; MAGUIRE-RAJPAUL et al., 2020; PERFECTO et al., 2005). Junto a essas condições, é importante lembrar que o Cerrado ocupa uma vasta região geográfica do Brasil (1.910.000 Km<sup>2</sup>) e tem características heterogêneas quanto as condições de relevo, fatores edáficos e quanto à fitofisionomia (CAMARGO et al., 2008; CARVALHO; DE MARCO; FERREIRA, 2009; JOSÉ et al., 2019; SILVA et al., 2006). Estas variações implicam em variações nos níveis de fragilidade ambiental potencial (FURLAN et al., 2021; RATTER; RIBEIRO; BRIDGEWATER, 1997; ROSS, 1994) e, devido à distribuição heterogênea das áreas destinadas à agricultura, áreas de preservação e reservas, a ocorrência de cada um destes usos de solo se distribui em regiões com diferentes níveis de

fragilidade potencial. O cerrado é, portanto, um ecossistema frágil que precisa ser observado e protegido para que não desapareça em breve.

Dessa forma, investigar e monitorar o avanço das práticas agrícolas sobre as regiões ambientalmente frágeis do cerrado, especialmente em regiões com sérios problemas ambientais como o Cerrado mineiro, é papel importante designado às pesquisas científicas. Resta saber, então, como ocorre o avanço da agricultura sobre as áreas frágeis? Quais as situações alavancam o avanço da agricultura sobre as áreas frágeis? As estratégias de proteção têm produzido bons resultados? Investigamos tais lacunas neste trabalho, mediante um estudo de caso no cerrado mineiro. O estudo de caso foi feito na bacia do Córrego Feio, localizada em Patrocínio, Minas Gerais, Brasil, por conta dos investimentos feitos em projetos de proteção ambiental nesta bacia, nos últimos anos. Assim, neste artigo relacionamos a evolução espaço-temporal (2017-2020) do uso agrícola do solo da bacia do Córrego Feio, com as diferentes zonas de fragilidade ambiental.

## **3.2 Material e Métodos**

### **3.2.1 Área de Estudo**

A região de estudo é a bacia do Córrego Feio, que tem área total de 9.329,4 hectares, localizada próxima à cidade de Patrocínio, Estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1).

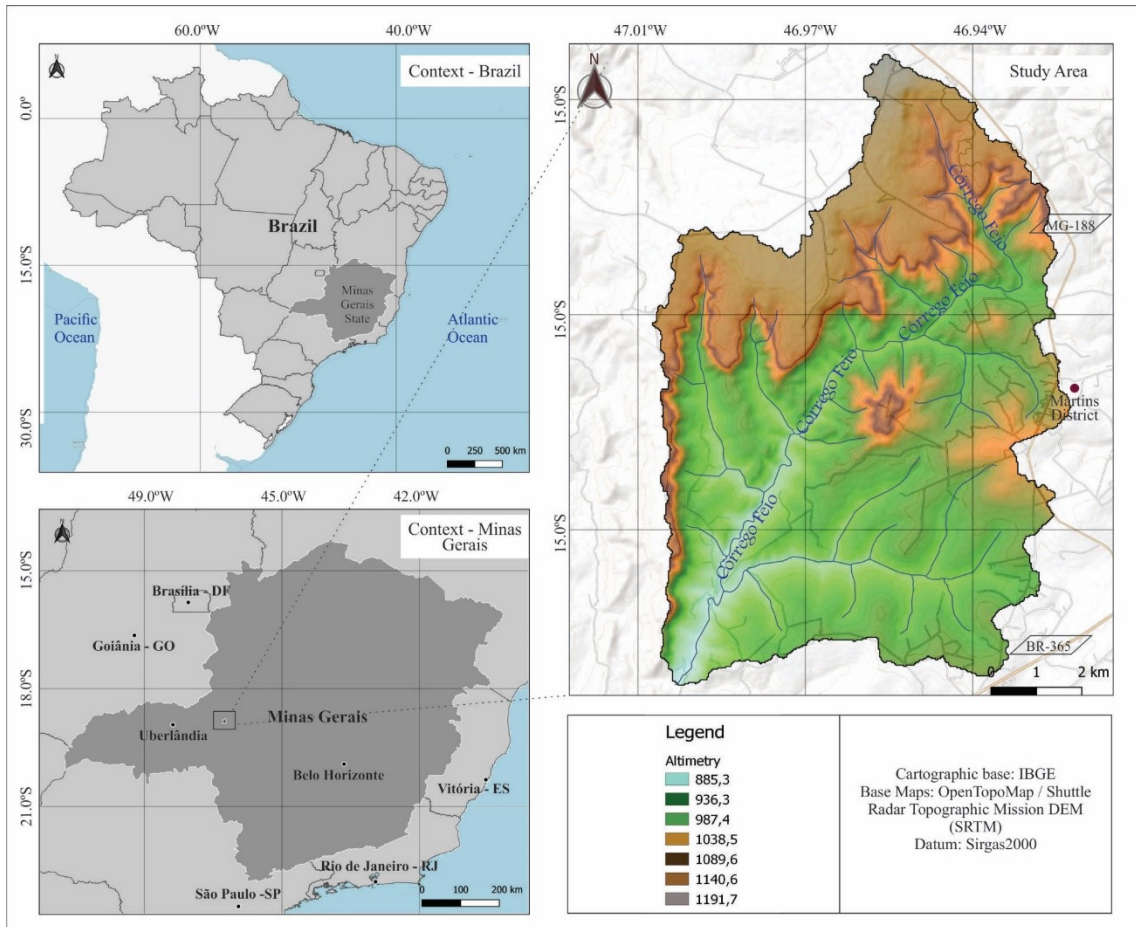


Figura 1. Contexto de Localização da bacia do Córrego Feio, Patrocínio, Minas Gerais.

Fonte: Os autores

A importância regional da bacia do Córrego Feio está atrelada à sua condição de fornecedora de água potável ao município de Patrocínio-MG (aproximadamente 100 mil habitantes), tanto na área urbana quanto em grande parte das propriedades rurais do município. O uso da água destinada à irrigação da agricultura é um dos principais fatores que preocupam as autoridades regionais, dado que práticas exploratórias, que inutilizam por vezes o recurso, podem ter consequências graves à produção e à população residente.

A bacia do Córrego Feio está situada em elevada altitude média (aproximadamente 1000m do nível do mar), apta ao cultivo do café, e como consequência, sua área é amplamente utilizada para o cultivo desta modalidade. O café produzido na bacia do Córrego Feio é exportado para todo o mundo, com destaque à produção de café arábica. Patrocínio-MG é o maior município produtor do grão, com média aproximada de 60 mi de kg de café produzidos por ano (EMATER, 2022). Entretanto, tem se observado mudanças no uso do solo destinado à agricultura do café que podem ser prejudiciais à conservação da fauna, flora e água, como, por exemplo, o plantio de soja e milho, relatado anteriormente. O déficit hídrico causado pela

agricultura na bacia do Córrego Feio é situação comum às demais bacias hidrográficas do Cerrado mineiro. Dessa forma, observando as características da bacia do Córrego Feio, é possível afirmar que as dinâmicas de ocupação do solo em seu interior são comuns à dinâmica de ocupação de outras bacias hidrográficas na região do Cerrado mineiro, portanto, as preocupações com o uso da água são representativas desta região geográfica. A Figura 2 ilustra os diferentes sistemas de uso e ocupação mais comuns pela agricultura na região.



Figura 2. Diferentes níveis de uso do solo na bacia. A – Plantação de café em pré-colheita (inverno) B – Sistema de plantio direto após colheita de milho safrinha C – Sistema de plantio convencional após silagem de milho safrinha.

Fonte: Os autores

Ademais, dada sua importância regional, a bacia do Córrego Feio tem sido monitorada por projetos de conservação ambiental. Existem estudos relacionados à preservação da biodiversidade local, como o projeto de proteção ao Pato Mergulhão (*Mergus octosetaceus*) (Figura 3), espécie endêmica ameaçada de extinção (ICMBio, 2020). Há ainda, iniciativas mais recentes voltadas à conservação ambiental local promovidas por cooperativas de produtores

(EXPOCACCER e FUNDACER), pelo Consórcio Águas do Cerrado e pelo Departamento de Água e Esgoto de Patrocínio (DAEPA), o qual retira a água da bacia em questão para o abastecimento do município. Essas iniciativas têm como finalidade preservar a qualidade e a quantidade de água disponível na microbacia, o que implica em um engajamento local dos produtores rurais para a preservação ambiental. Este engajamento também ocorre devido à pressão pela conservação da bacia por parte da população do município, que usa a água ali captada.



Figura 3. Pato Mergulhão

Fonte: ICMBio

Neste cenário de projetos de conservação da bacia do Córrego Feio, destacamos a parceria entre o Consórcio Águas do Cerrado, do qual fazem parte a Federação de cafeicultores do cerrado, Nespresso, Lavazza, Nestlé, ONG Cervivo e Cooxupé, em conjunto e a União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN), que trabalham com o intuito de, também, preservar a água na bacia. A estratégia utilizada para isto é um programa nomeado “Programa de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA)” que visa gerar remuneração ao produtor rural que aderir ao projeto e prestar serviços para conservar a bacia do Córrego Feio. Este projeto data do ano de 2015 (REVISTA CAFEICULTURA, 2017), entretanto, até o desenvolvimento do presente artigo, não se avaliou se a conservação tem sido promovida, mesmo com tantos incentivos à preservação. Dessa forma, entendemos que avaliar a bacia do

Córrego Feio pode subsidiar políticas de outras bacias hidrográficas em situação semelhante, no Cerrado mineiro.

### 3.2.2 Métodos

Os procedimentos deste estudo estão descritos no fluxograma da Figura 4. Nele representamos as etapas gerais para a geração dos produtos que nos permitiram analisar a ocupação de áreas frágeis pela agricultura na bacia do Córrego Feio.

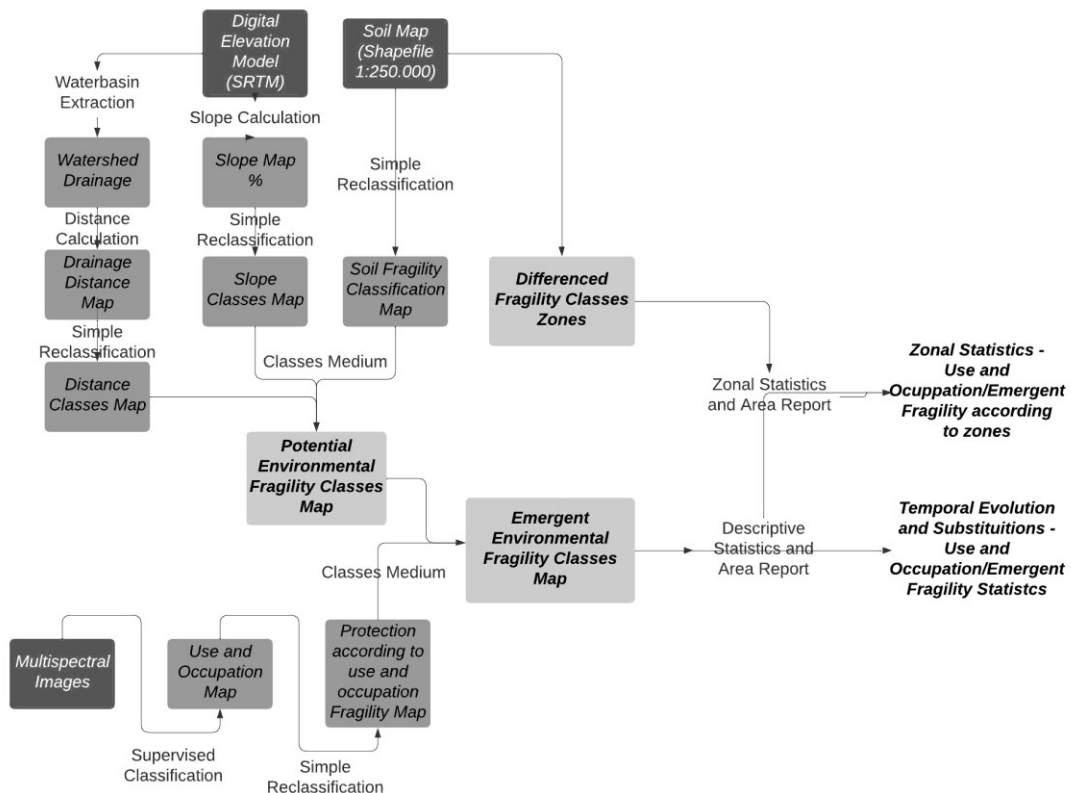


Figura 4. Processos para obtenção dos níveis de Fragilidade Ambiental e sua análise. Fonte: Os autores (2020)

Como pode ser observado na Figura 4, para a geração dos mapas de fragilidade ambiental adotamos o método proposto por Ross (1994), com nossa adaptação à realidade da região. O método proposto por Ross considera classes de declividade, de solo e de uso e cobertura do solo como fatores de influência sobre a fragilidade ambiental de uma área. A combinação destes fatores determina o nível de fragilidade ambiental. Nossa adaptação ao modelo proposto por Ross (1994) se deu ao acrescentarmos um parâmetro à classificação de

fragilidade, a saber, a distância de cada região até a drenagem mais próxima, como mais um indicativo de fragilidade.

Especificamente, o procedimento de levantamento da fragilidade ambiental emergente foi realizado para quatro anos consecutivos (2017 a 2020), nos meses de julho, conforme disponibilidade das imagens de satélite para o mapeamento de uso e cobertura do solo. A escolha do mês de Julho se deve à maior facilidade de diferenciação entre áreas de SPD e plantio convencional na entressafra, por conta da diferença de resposta espectral entre material vegetal em decomposição e solo exposto. Optou-se por avaliar a bacia nestes anos visto que são datas subsequentes à implantação dos projetos de conservação da bacia, iniciados no ano de 2015. As imagens utilizadas neste estudo foram obtidas pelo sensor MSI (Multispectral Instrument) do satélite Sentinel 2, nos quatro anos consecutivos. Para aquisição das imagens foi utilizado a plataforma EarthExplorer (USGS, 2020). As etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento das imagens multiespectrais foram todas realizadas por ferramentas disponíveis no *software* open source QGIS. As imagens adquiridas foram pré-processadas com a utilização do plugin Semi-automatic Classification Plugin (SCP), corrigindo-se efeitos atmosféricos através dos metadados de cada imagem (MTL); nessa etapa ainda fizemos a transformação dos dados brutos para valores percentuais de reflectância. Posteriormente foi realizado o registro das imagens com a identificação de pontos homólogos, para que as imagens tomadas em diferentes épocas e condições ficassem perfeitamente sobrepostas.

Na fase de processamento, aplicamos o processo de classificação semiautomática das imagens - também através do plugin SCP - para mapear as classes de uso do solo, baseadas nas categorias de cobertura vegetal. A Tabela 1 mostra as classes de cada região de cobertura, adaptadas da proposta por Ross (1994). Este procedimento foi realizado para todos os anos de interesse no estudo. Posteriormente, os mapas de uso e ocupação do solo foram reclassificados a partir da ferramenta *r.reclass* para as classes de fragilidade ambiental, conforme a Tabela 1.

Para a classificação da declividade foi utilizado como base o modelo digital de elevação SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), obtido a partir do catálogo Topodata (VALERIANO, 2008). Aplicamos aos dados TOPODATA a ferramenta *r.slope.aspect* (GRASS GIS) e geramos o mapa de declividade. Ainda utilizando o MDE - TOPODATA delimitamos a área da bacia utilizando a ferramenta *r.watershed*. Neste procedimento também foi gerada a drenagem da bacia em formato de imagem, dado utilizado como entrada no processo *r.grow.distance*, que resultou no mapa de distância relativa à drenagem. Os mapas gerados de declividade e distância para a drenagem foram reclassificados com também com

utilização da ferramenta `r.reclass`, com base nos parâmetros especificados na Tabela 1, resultando nos mapas de classes de fragilidade relativos a cada um desses parâmetros.

Já os mapas de solos utilizados para classificação foram obtidos a partir da base de dados do Geoinfo (EMBRAPA, 2022). O mapeamento data do ano de 1999 e está na escala de 1:250.000. O processamento foi feito utilizando a ferramenta de `r.reclass` com base nos parâmetros da Tabela 1, assim como nos casos anteriores, resultando no mapa de classes de fragilidade relativas à ordem de solo.



Tabela 1. Categorias hierárquicas de fragilidade ambiental para os fatores declividade, classe de solo, tipo de cobertura vegetal e distância da drenagem.

<b>Categorias Hierárquicas</b>	<b>Declividade</b>	<b>Classe de Solo</b>	<b>Tipos de Cobertura Vegetal</b>	<b>Distância da drenagem</b>
Muito Fraca	<6%	Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelo Argiloso, Latossolo Amarelo Argiloso	Florestas/Matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade	>120 metros
Fraca	6-12%	Latossolos amarelo e vermelho amarelo (Textura média ou baixa)	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso, formações arbustivas densas, cultivo de ciclo longo com manejo de conservação (Cafeicultura)	90-120 metros
Média	12-20%	Argissolos (A argiloso)	Pastagens com baixo pisoteio, silvicultura de eucaliptos, Sistema de Plantio Direto, Campo Cerrado e Campo Rupestre	60-90 metros
Forte	20-30	Argissolos (A arenoso), Cambissolos (Flúvicos e Hísticos), Nitossolos	Culturas de ciclo longo de baixa densidade e culturas de ciclo curto em nível ou terraceadas	30-60 metros
Muito Forte	>30%	Neossolos, Argissolos e Cambissolos (Háplicos)	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por cultivo ou estradas, terraplanagens, cultivo curto convencional	<30 metros

Fonte: Os autores, adaptado de Ross (1994)

Para obtenção da fragilidade ambiental potencial foi realizada a soma das subclasses obtidas relativas à declividade, distância da drenagem e ordem de solos e feita a média

aritmética da classe. Desta forma, chegou-se à classificação com base em 5 classes de fragilidade potencial. Da mesma forma, a fragilidade ambiental emergente para cada ano foi obtida com a média de todas as quatro subclasses, incluindo uso e ocupação do solo, resultando em 5 classes de fragilidade emergente para cada ano, conforme colocado na Figura 4.

Posteriormente à geração dos mapas relativos à fragilidade emergente anual e à fragilidade potencial, criamos zonas de análise cujas características internas são homogêneas quanto aos níveis de fragilidade ambiental. Formaram-se então 2 zonas de baixa fragilidade e 2 zonas de maior fragilidade. Este zoneamento baseou-se, principalmente, no mapa de solos, dado que os solos são elementos que se desenvolvem na paisagem de modo conectado às características ambientais das áreas nas quais ocorrem. Assim, o zoneamento proposto buscou nos permitir avaliar se a fragilidade ambiental dentro de cada zona se alterou temporalmente, bem como, se houve substituição do uso e ocupação, ou ainda, se houve evolução ou involução da área ocupada por classes de interesse para o trabalho, principalmente áreas de vegetação nativa e àquela ocupadas por cafeicultura. Esta análise nos permitiu também relatar as alterações nas áreas de maior ocupação agrícola e a evolução da restauração próxima ao curso principal do Córrego Feio.

Dessa forma, a partir da ferramenta Estatísticas Zonais do QGIS foram extraídas estatísticas relativas à classificação de uso do solo nos diferentes anos para as diferentes zonas, com a finalidade de comparar a evolução das classes de uso e ocupação e de verificar a evolução e/ou involução da vegetação nativa, dentro de cada uma das zonas de avaliação. Todas as estatísticas relacionadas à contagem de píxeis e sua respectiva representação em área ocupada por cada classe foram obtidas a partir da ferramenta r.report.

Finalmente, calculamos também o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para cada um dos anos de estudo, de modo a comparar de forma qualitativa a evolução de áreas previamente existentes de vegetação nativa. A extração de estatísticas descritivas foi feita para as classes de ocupação por campos cerrados e rupestres e para as áreas de vegetação densa a partir da ferramenta rasterlayerszonalstats. Foi também realizado o buffer de 30 metros para a drenagem e de 50 metros para os pontos de nascentes para extração da Área de Preservação Permanente (APP) da bacia e a partir do vetor gerado extraídas as estatísticas zonais relativas às APP's através da ferramenta zonal statistics (Figura 5).

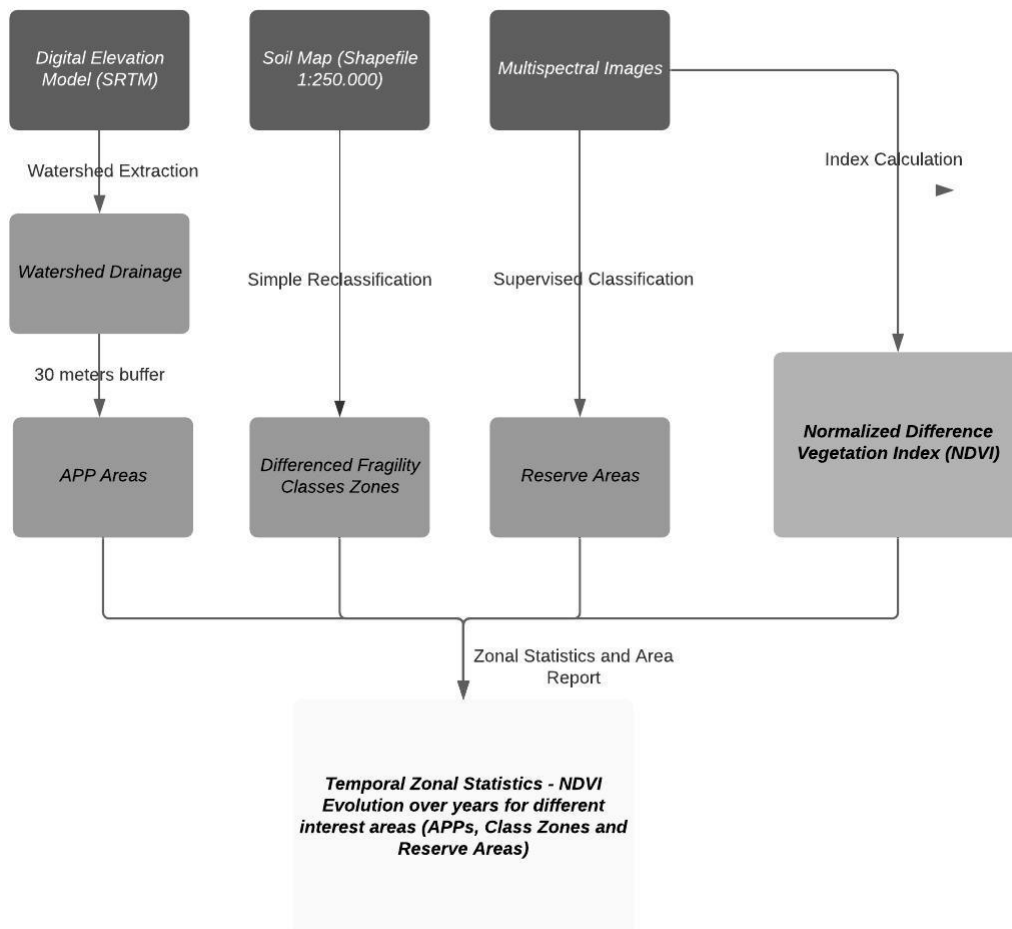


Figura 5. Processo para análise temporal do índice NDVI para áreas de interesse.

Fonte: Os autores (2020)

### 3.2.3 Análise dos resultados

Analisamos as alterações nos valores de fragilidade ao longo dos anos, comparando-se com as alterações do uso do solo na bacia. Verificamos se a substituição da cultura agrícola do café para o Sistema de Plantio Direto ocorreu em áreas mais frágeis observando os valores absolutos de cada classe de uso e ocupação na bacia com um todo, assim como dentro de cada zona definida anteriormente. Quantificamos a ocorrência das áreas frágeis nas diferentes zonas, conforme relatado anteriormente. Observamos as áreas de proteção ambiental - asseguradas por lei - foram respeitadas pelas práticas agrícolas após a implantação dos projetos que incentivam a preservação da natureza da bacia do Córrego Feio. Por meio da quantificação do índice espectral NDVI nas diferentes zonas, caracterizamos o estado de conservação das áreas que deveriam estar preservadas, de modo a verificar os impactos da substituição de culturas na bacia do Córrego Feio.

A avaliação do NDVI foi feita para as diferentes zonas de extração obtidas através do processamento dos vetores de interesse (campos, vegetação densa e APP's) através da análise de tendência dos valores médios de NDVI nas zonas ao longo dos anos para cada um dos vetores em questão. Esta análise permitiu-nos inferir se existe ou não conservação de áreas de preservação ou reserva em qualidade fotossintética e/ou biomassa da vegetação nelas existentes.

### 3.3 Resultados e Discussão

Ao se analisar os resultados das Figuras 6 e 7 confirmamos a suspeita inicial de tendência de mudança nas práticas agrícolas na bacia do Córrego feio que impactam a conservação do ecossistema local, destacando-se a substituição da cultura do café, a qual possui maior prevalência de práticas conservacionistas, por prática de cultivo de grãos em SPD, mais agressivas ao ambiente e grandes responsáveis pelo avanço da agricultura sobre áreas frágeis no cerrado (CROUZEILLES et al., 2017; SANO et al., 2019). Com os resultados desta pesquisa, notamos que o SPD também suplantou o sistema de plantio convencional na área de estudo, fato comum a todo o cerrado desde a década de 1990, conforme afirmam de Freitas e Landers (DE FREITAS; LANDERS, 2014). Consideramos esse último resultado um avanço no perfil de conservação da área de estudo. Entretanto, tanto o sistema de plantio convencional quanto o SPD proporcionam menor proteção do solo quando comparados à cafeicultura, e conseqüentemente, menor conservação de recursos naturais (CASTRO; NETO, 2009).

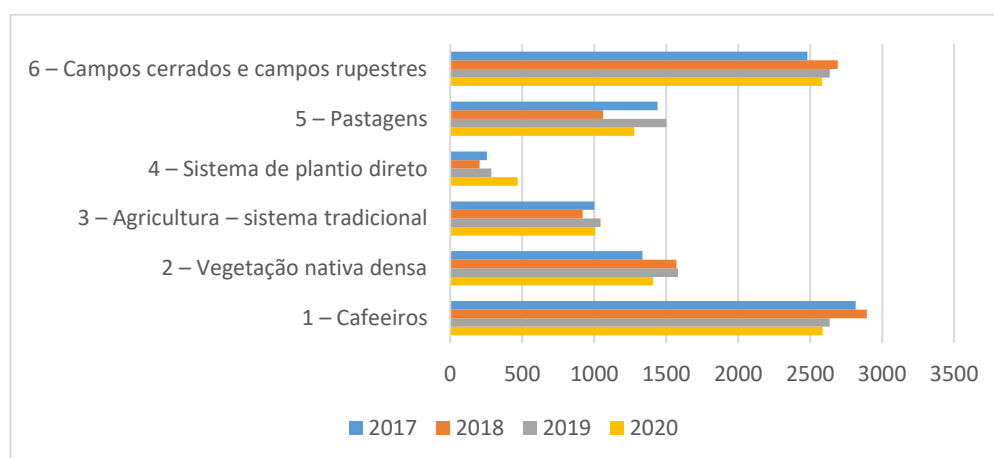


Figura 6. Evolução temporal da área (hectares) ocupada por cada classe de uso e ocupação ao longo de 4 anos.

Fonte: Os autores

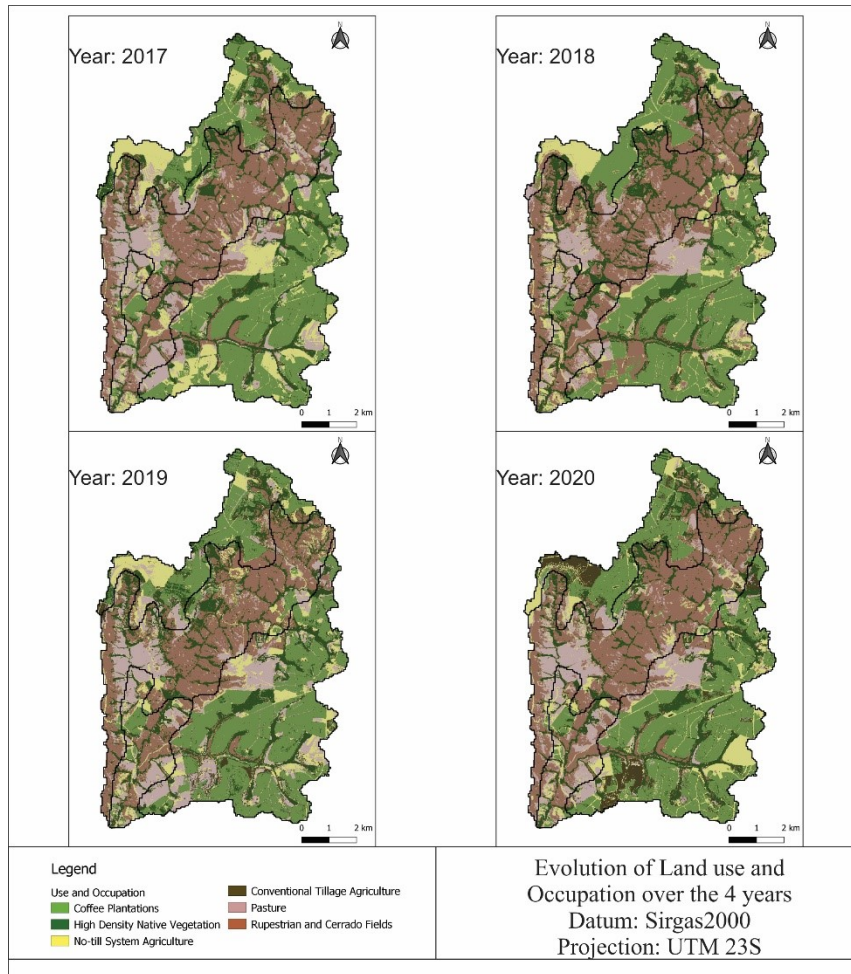


Figura 7. Evolução temporal de uso e ocupação de 2017 a 2020.

Fonte: Os autores

Especificamente, observamos que as divisões das classes de solo acompanham as divisões mais bruscas de fragilidade ambiental, devido à sua relação com o tipo de vegetação e declividade, e deste ponto decidimos utilizar esta divisão como um zoneamento interno da bacia. Com a observação da fragilidade potencial conseguimos estabelecer zonas de relativa homogeneidade para analisar as causas e consequências do avanço da agricultura sobre áreas frágeis. O zoneamento é importante pois conduz homogeneização dos cuidados internos à uma zona, bem como, permite avaliação integrada da paisagem, por destacar características importantes. Aqui encontramos quatro diferentes zonas de fragilidade, definidas pelo solo predominante (Neossolo, Cambiossolo ou Latossolo), sendo as duas zonas compostas de latossolos (1 e 2) as menos frágeis, a zona composta de cambissolos (3) de fragilidade média-alta e a composta de neossolos (4), a de maior fragilidade. O zoneamento pode ser observado na Figura 8.

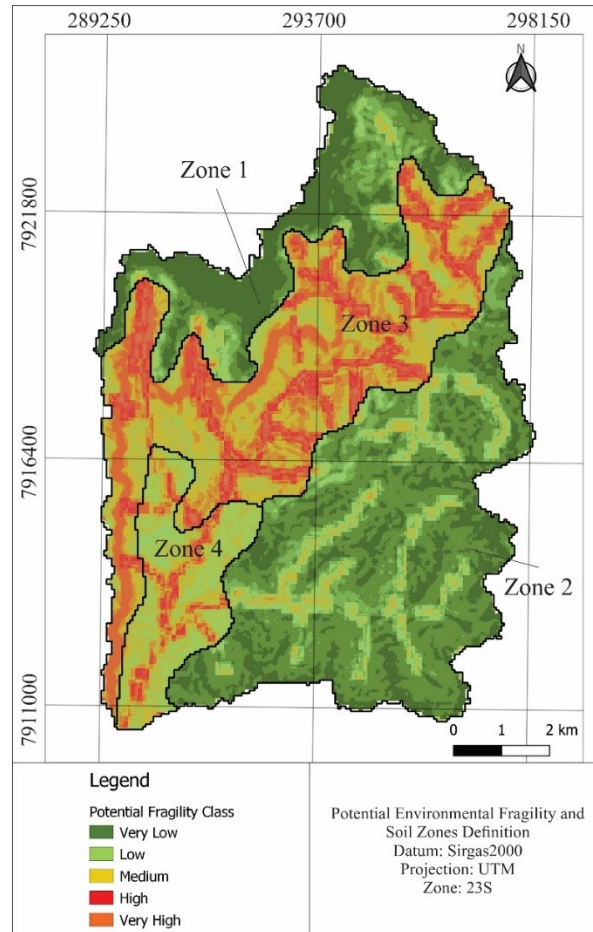


Figura 8. Fragilidade Ambiental Potencial e zonas definidas pelas Ordens de Solos.

Fonte: Os autores

Com este resultado, constatamos a predominância da cafeicultura nas zonas 1 e 2, de baixa fragilidade potencial, enquanto as zonas 3 e 4, de maior fragilidade, encontram-se em situações distintas, sendo em grande parte conservada ou em recuperação, conforme exemplo ilustrado na Figura 9, ou, quando antropizada, encontra-se ocupada por atividades de alta agressividade, como o cultivo convencional de grãos, principalmente milho, e também por pastagens. Essa é uma situação preocupante quando relacionada à conservação de água e aos processos erosivos regionais (CASTRO; NETO, 2009; DERPSCH et al., 2014; LENSE et al., 2019). Desta forma, podemos afirmar que, embora o avanço da agricultura seja maior nas zonas 1 e 2, as zonas de maior preocupação são as 3 e 4, pois, além de serem mais frágeis, são ocupadas por atividades de maior agressividade aos recursos naturais. Isto mostra que mesmo com os projetos de incentivo à conservação, não houve, no período estudado, aumento ou diminuição das áreas preservadas.



Figura 9. Área de pastagem em recuperação cercada por áreas de conservação em local de alta declividade próximo ao Córrego Feio.

Fonte: Os autores.

É importante ressaltar que, na área de estudo que avaliamos, as atividades de maior impacto são geralmente executadas por pequenos produtores em sistema de agricultura familiar ligados principalmente à bovinocultura, comumente praticada em terras de preço mais acessível e conseqüentemente mais frágeis, fazendo com que mesmo em uma bacia hidrográfica com incentivos para a proteção de áreas frágeis, estes tenham que recorrer à utilização de porções do espaço que deveriam ser destinada à preservação para a execução de suas atividades. É necessário, portanto, que se direcione ações a esta categoria de produtores rurais que, muitas vezes, não compreendem a importância da preservação ou não têm condições de ceder terreno em detrimento da própria subsistência.

Os resultados de nossa pesquisa indicam, que embora haja prevalência de áreas de recuperação de campos cerrados nas áreas de maior fragilidade, existe ainda ocorrência de áreas de sistema de plantio convencional e de pastagens nos locais de mais alta fragilidade da bacia, com prevalência nas proximidades dos cursos fluviais. Este cenário pode ser observado ao se analisar as Figuras 6 e 7. Isto representa ameaça a conservação das águas da bacia, principalmente pela ocorrência de assoreamento dos rios devido ao alto índice de erosão

ocorrente nestas áreas. Essa é uma dinâmica comum ao Cerrado, especialmente ao Cerrado mineiro (GRECCHI et al., 2014; SOUZA et al., 2020). A Figura 10 ilustra a situação, com a presença de áreas de silagem em alta declividade em proximidade de cursos fluviais.

Tabela 2. Hectares ocupados por cada classe de Fragilidade Ambiental no ano de 2020 em cada uma das zonas definidas.

Classe de Fragilidade	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1 – Muito Fraca	222,12	483,19	440,81	131,25
2 – Fraca	641,48	1912,58	160,60	114,36
3 – Média	412,41	247,59	1737,62	265,92
4 – Forte	106,86	389,99	621,80	294,82
5 – Muito Forte	189,51	619,98	167,62	112,52
Média de classes de FA	2,618	2,658	2,972	3,155

Fonte: Os autores



Figura 10. Área de alta declividade ocupada por atividade de alto impacto (silagem) próxima ao leito principal do Córrego Feio.

Fonte: Os autores (2020)

Esses resultados demonstraram que mesmo uma região com políticas de preservação estabelecidas em projetos que incentivam a conservação, a ocupação de áreas ambientalmente frágeis é comum no cerrado. Esse resultado pode ser observado ao se analisar os mapas das Figuras 7 e 11, que demonstram que as medidas de promoção de preservação devem adotar caminhos diferentes, mais enérgicos.

Como indicado anteriormente, notamos haver avanço no uso do solo associado ao Sistema de Plantio Direto, associado a culturas anuais como a soja, milho e sorgo. O Sistema de Plantio direto é caracterizado pela ausência de revolvimento do solo ao longo dos cultivos,



o que o torna um sistema de plantio mais conservacionista quando comparado ao sistema convencional (ARSHAD, 1999; DE FREITAS; LANDERS, 2014; DERPSCHE et al., 2014). De toda forma, a substituição de culturas menos agressivas ao meio ambiente, como é o caso do café, especialmente em áreas com níveis de fragilidade ambiental maiores, são sintomas dos desequilíbrios hídricos e fitossanitários que o Cerrado tem enfrentado (CASTRO; NETO, 2009). No caso da bacia, a substituição tem ocorrido principalmente nas zonas 1 e 2, de menor fragilidade.

Existem uma série de fatores que podem catalisar a substituição para o sistema de plantio direto. Dentre elas podemos citar a atratividade pelo aumento da lucratividade de culturas anuais como soja e milho nos últimos anos (SANTOS et al., 2021), a facilidade de implementação agrícola de cultivos anuais em grandes áreas, a pressão de pragas e doenças sobre a cultura do café (DE FREITAS; LANDERS, 2014; OVALLE-RIVERA et al., 2015; ZISKA et al., 2018) ou mesmo uma substituição temporária visando a reconstituição de lavouras muito velhas, prática esta necessária a uma cafeicultura sustentável (CASTRO; NETO, 2009; FEARNSSIDE, 2001). Aqui destacamos um aspecto importante - que onera a produção do café e incentiva a substituição desta cultura na região – relacionado à pressão advinda dos consumidores finais de café, que, cada vez mais, buscam produtos cultivados em processos sustentáveis, menos agressivo ao ambiente, validados por certificações (BARRA, 2019; GHINI et al., 2008; MAGUIRE-RAJPAUL et al., 2020).

Ainda, se olharmos para o potencial de uso e ocupação conforme a fragilidade ambiental, separada conforme o zoneamento (Figura 11), existe, geralmente, uma distribuição deste uso e ocupação de forma desejável. Isto é, as áreas de menor fragilidade potencial são utilizadas para agricultura e as de grande fragilidade se mantendo preservadas. Porém, estas áreas de preservação apresentam grande fragilidade emergente, tendo em vista que sua fitofisionomia natural é composta por campos rupestres e campos cerrados, além de que, quando antropizadas, existe a prevalência de atividades de alto impacto ambiental, como a pecuária.

Dessa forma, com esses resultados podemos afirmar que existe uma relação direta entre os níveis de fragilidade, o valor monetário da terra e seu principal tipo de uso e ocupação. As áreas de menor fragilidade potencial, representadas pelas zonas 1 e 2 são aquelas mais valorizadas na região e comumente ocupadas por produtores de médio e grande porte, adeptos da cafeicultura e do SPD. As áreas de maior fragilidade ambiental, compostas pelas zonas 3 e 4, são menos valorizadas e nelas distribuídas pequenas propriedades, nas quais existem atividades ligadas à pecuária de leite e corte, como pastagens e áreas de cultivo convencional

direcionadas à silagem, sendo que estas, embora ocupem menor espaço, são mais agressivas ao meio ambiente por proporcionar menor cobertura do solo e variações bruscas dessa cobertura ao longo do ano.

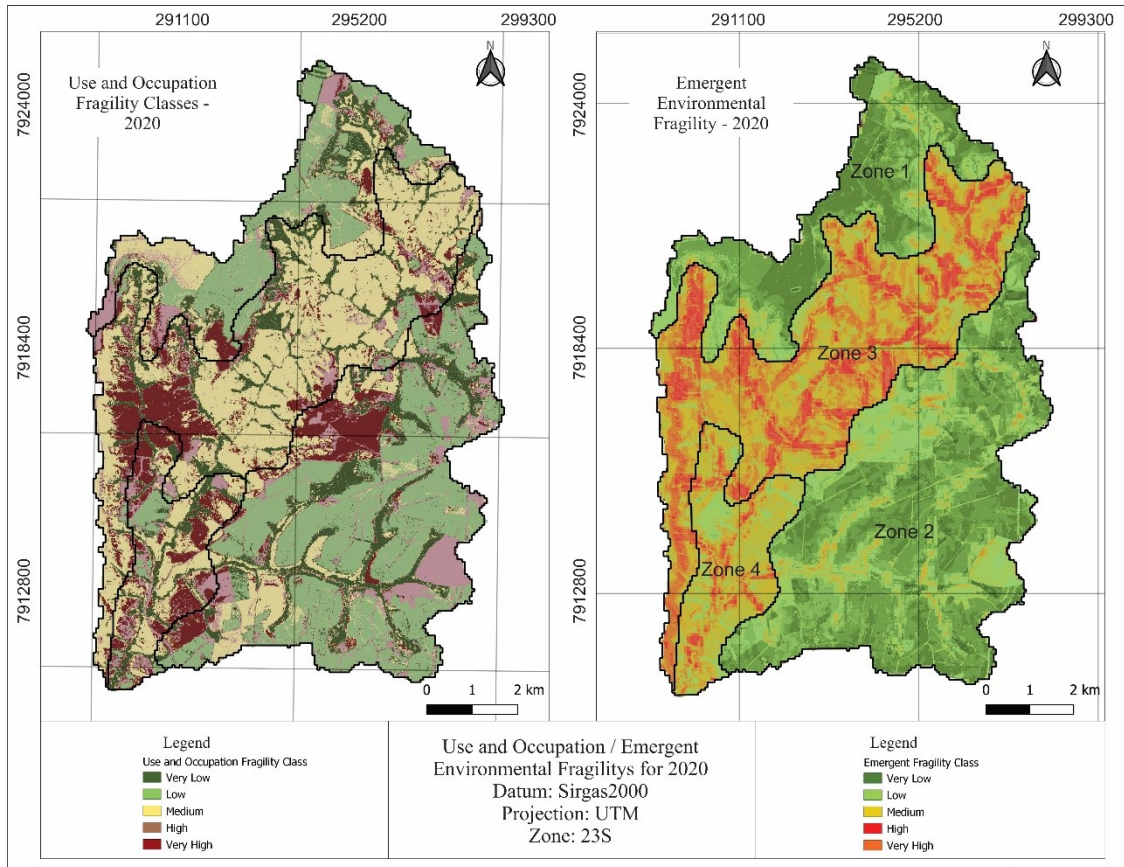


Figura 11. Mapa de Fragilidade por uso e ocupação seguido do Mapa de Fragilidade Ambiental Emergente (ano de 2020).

Fonte: Os autores

Foi possível observar significativo aumento do valor médio de NDVI quando este foi analisado para as APP's e vegetações de maior densidade da bacia hidrográfica, sendo que este aumento ocorreu de 2018 para 2019 e se estabilizou entre 2019 e 2020, enquanto para as áreas compostas por campos rupestres e cerrados houve um aumento em relação ao ano de 2016 até 2019, porém com diminuição do valor entre os anos de 2019 e 2020, conforme exposto no gráfico da Figura 12.

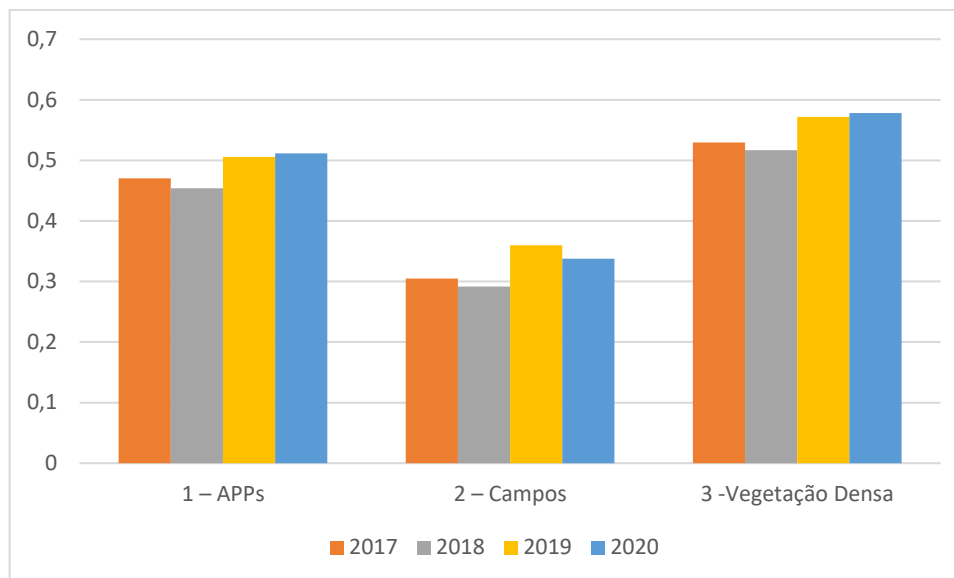


Figura 12. Médias de NDVI de acordo com o vetor de extração

Fonte: Os autores

A partir destes resultados podemos inferir haver uma melhora qualitativa da vegetação de maior densidade, com inclusão das APP's, para a sequência de anos de nosso estudo, que pode ser um indicativo de funcionamento dos projetos de conservação destas áreas. Quando observadas áreas que previamente já eram constituídas por reservas e APP's, não foi observada melhoria em quantidade de área nos anos estudados, o que contrapõe nossa afirmação anterior. Isso quer dizer que os projetos de conservação funcionaram bem para áreas de preservação já estabelecidas, aumentando o vigor da vegetação nessas regiões, mas não impulsionaram o surgimento de novas áreas de preservação. A Figura 13 mostra o aspecto do Córrego Feio em suas margens.

Adicionalmente, embora tenhamos observado tendência de aumento dos valores médios de NDVI para as áreas de campo até 2019, a diminuição para o ano de 2020 é negativa e provavelmente se deve à ocorrência de queimadas nestas áreas. Dessa forma, destacamos ser necessário que as políticas de incentivo à preservação do cerrado direcionem esforços à inibição dos incêndios criminosos, os quais ocorrem de forma crescente na região do Cerrado mineiro, em especial, na bacia do Córrego Feio, um caso representativo desta realidade.

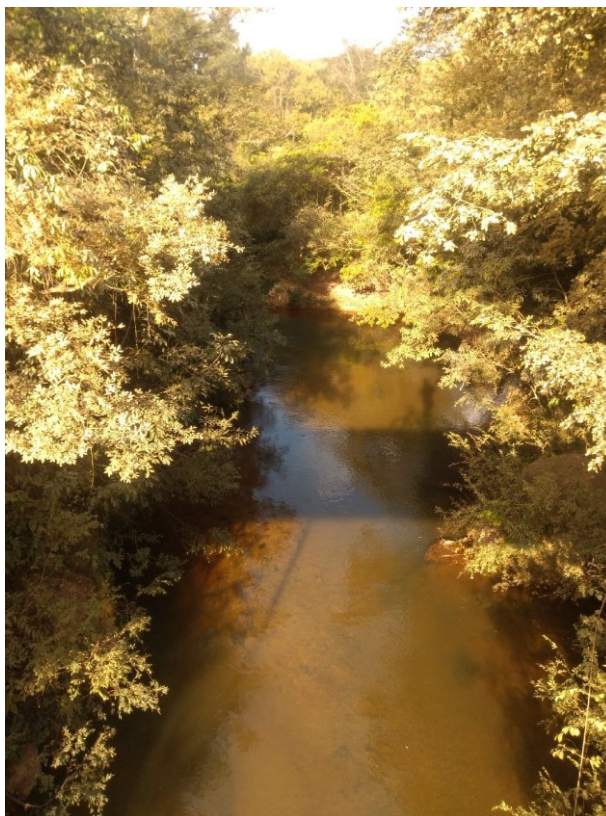


Figura 13. APP do Córrego Feio

Fonte: Os autores

### 3.4 Conclusões

Aqui concluímos que, majoritariamente, o avanço da agricultura sobre áreas frágeis em nossa área de estudo ocorre principalmente por atividades de alto impacto e, de forma geral, associadas à pecuária. Isto também se deve ao potencial de uso do solo, menor para cultivos extensivos nestas áreas, o que auxilia no direcionamento de sua ocupação por produtores de menor porte com práticas agrícolas agressivas ao ambiente.

Quanto as estratégias de proteção da área de estudo, detectamos que, para os anos avaliados, não houve crescimento das áreas de preservação. Em contrapartida, constatamos que houve melhoria na densidade e no vigor da vegetação preservada nas Áreas de Preservação Permanente. Ainda, concluímos que as áreas de campo perderam mais vigor na vegetação quando comparados a outras classes, provavelmente devido as intensas queimadas ocorridas nos últimos anos. Isto mostra que as estratégias de preservação ainda não surtiram o efeito desejado, o que pode acontecer em maior prazo, tornando necessário o acompanhamento do local.

Especificamente, nossos resultados demonstram que a segurança hídrica da bacia do Córrego Feio pode estar fragilizada, pois, não houve avanço na conservação das matas nativas próximas aos rios. Isso demonstra que um dos focos de melhoramentos nas políticas de combate à má utilização dos recursos naturais devem observar as regiões nas quais se pratica a pecuária. Os produtores desta modalidade comumente abrem caminho nas áreas de preservação para que o gado beba água diretamente no Córrego. Segundo Blackburn and Blackburn, 1997 a pecuária é uma das grandes responsáveis pela degradação ambiental e, no Cerrado mineiro, essa é uma realidade recorrente. Para se combater essa dinâmica de ocupação que degrada o meio ambiente regional, deve-se incentivar a produção de culturas tradicionais à região - como a cafeicultura - uma vez são menos impactantes ao ambiente, assim como os sistemas integrados de produção (ARAÚJO COSTA et al., 2019; PACHECO et al., 2012).

Talvez seja necessário que exista adesão do produtor rural aos processos das políticas de preservação. De toda forma este processo é complicado quando a área de propriedade em questão é pequena e encontra-se em limite de ocupação, devido às práticas comuns destes agricultores. O incentivo a uma agricultura mais intensivista e com integração de fatores de produção (lavoura, floresta e pecuária) pode ser uma solução viável e menos agressiva de substituição de uso e ocupação do solo. Quando em áreas maiores, nota-se que a bonificação do produtor, comumente colocada a partir dos processos de certificação, funcionam de forma mais fácil para adesão a projetos de conservação (GAVRONSKI; FERRER; PAIVA, 2008; MAGUIRE-RAJPAUL et al., 2020; PINTO; MCDERMOTT, 2013; SANCHEZ et al., 2005).

## **4 CAPÍTULO 2 - UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO DE CAFEEIROS (*Coffea arabica* L.) BASEADO NA OBSERVAÇÃO DE ELEMENTOS DA PAISAGEM**

### **RESUMO**

O entendimento do potencial produtivo é essencial com a finalidade de racionalizar o uso de insumos e direcionar as áreas conforme seu potencial, prática necessária ao desenvolvimento de uma agricultura sustentável. Neste artigo criamos um modelo multicritério para estimativa do potencial produtivo de cafeeiros baseado na observação de elementos da paisagem que determinam a Fragilidade Ambiental (FA). Os parâmetros de entrada do modelo foram dados de declividade e forma de terreno, poder de fluxo da vertente e dados de imagens orbitais (Landsat 8) que nos permitiram calcular o índice de vegetação NDVI. Aplicamos o modelo desenvolvido em cafeeiros plantados na região de Bambuí, Minas Gerais, Brasil. Foram 7 talhões com dados de produtividade em uma série histórica recente. Comparamos os níveis de produtividade preditos pelo modelo de FA e os dados históricos de produtividade das áreas cafeeiras para os anos de 2016, 2018 e 2020. O modelo adaptado para predição de potencial produtivo mostrou alta correlação entre o potencial calculado e a produtividade anual observada no teste de regressão ( $R^2$  médio = 0,9). Nosso modelo conseguiu estimar satisfatoriamente o potencial produtivo anual na área de estudo.

Palavras-Chave: Cafeeiro, Predição, Potencial Produtivo, Fragilidade Ambiental, Sustentabilidade.

### **4.1 Introdução**

Uma agricultura sustentável, construída através de práticas minimamente agressivas ao meio ambiente e, em simultâneo, produtiva, é o anseio da sociedade moderna (Mullan and Haqq-Misra, 2019; Tripathi et al., 2018). Paralelamente, esse desejo de evolução tem encontrado barreiras no crescimento populacional acelerado e na ocupação desordenada do espaço geográfico, colocando-se em risco a preservação dos recursos naturais do planeta Terra (PRETTY, 2008). Com efeito, é necessário desenvolvermos estratégias que possibilitem incremento produtivo de forma sustentável, através do conhecimento e gestão dos recursos disponíveis, especialmente, em áreas onde se pratica a agricultura (CROSBY, 2017).

Para o desenvolvimento de estratégias inteligentes de gestão dos recursos naturais, a Agricultura de Precisão (AP) tem se destacado como uma importante aliada, pois nesta modalidade se faz o manejo das culturas conforme a variabilidade espacial e/ou temporal de fatores ambientais (ZHANG; WANG; WANG, 2002). O uso da AP nas práticas agrícolas leva ao uso racional de insumos, fomentando, diretamente, a sustentabilidade (GARDEZI; STOCK, 2021). Ainda, de forma indireta, a AP propicia uma menor entrada de insumos químicos nas lavouras, um menor tráfego de maquinário, evitando-se, por exemplo, a compactação do solo, reduzindo os riscos de contaminação da água, bem como, os danos à saúde humana dos trabalhadores envolvidos com a aplicação de insumos químicos (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004).

Apesar dos avanços tecnológicos nas práticas de manejo, do melhoramento genético, emprego de insumos biológicos as quais são pilares produtivos dos sistemas agrícolas, junto também ao apoio da AP no aumento da produtividade, as variáveis ambientais, como o clima, os solos e a disponibilidade hídrica, são, ainda, fatores preponderantes na produtividade (SENTELHAS et al., 2018). Por exemplo, sobre o cultivo do café, sabe-se que a topografia e o tipo do solo influenciam na capacidade de retenção de água, bem como, na manutenção e disponibilidade de macro e micronutrientes (CRAVE; GASCUEL-ODOUX, 1997; SCHNABEL; DAHLGREN; MORENO-MARCOS, 2013; SILVA et al., 2018). Essas capacidades têm estreita relação com a produtividade e a qualidade dos cafeeiros (MINTESNOT; DECHASSA; MOHAMMED, 2015; SANCHEZ, 2009; SANCHEZ et al., 2005) e bastaria mapear os tipos de solo associado às informações meteorológicas locais para se determinar - satisfatoriamente - o potencial produtivo de lavouras de café (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004). Entretanto, o mapeamento dos solos é tarefa onerosa em seu formato tradicional, o que inviabiliza a cobertura de grandes áreas com mapas produzidos em escalas também grandes (SANCHEZ et al., 2005). Essa condição torna elementar a proposta de alternativas para se mapear o potencial produtivo em regiões específicas e em larga escala de regiões agrícolas, assim como fazemos neste artigo.

Importante ressaltar que aqui entendemos o Potencial Produtivo enquanto a capacidade de produção de uma determinada lavoura, considerando-se sua genética, clima, solo e manejo, sem a interferência de estresses bióticos e abióticos (BOSCHINI, 2010; EVANS; FISCHER, 1999). Complementarmente, entendemos que a Produtividade é a medida que relaciona a quantidade de um determinado produto produzido em um determinado espaço (ROGERS, 1998). Para ambos adotamos a medida em sacas de café beneficiado colhidas por hectare. Consideramos que ao investigar o potencial produtivo de uma região ou uma lavoura, o

profissional envolvido com esta tarefa naturalmente adotará práticas sustentáveis na agricultura, dado que planejará o manejo conforme as capacidades e condições locais. Uma alternativa para o mapeamento do potencial produtivo de lavouras se baseia na observação de covariáveis que possibilitem a predição, mensuração ou medida de parâmetros. Estas são captadas por instrumentos como os sensores remotos imageadores (BOSCHINI, 2010; MINTESNOT; DECHASSA; MOHAMMED, 2015). Nesse caso, é preciso observar variáveis relacionadas aos solos, à vegetação, ao relevo, e à paisagem, pois existe uma estreita relação entre estes fatores e a produtividade (EVANS; FISCHER, 1999; GASQUES et al., 2014; SANCHEZ, 2009). Neste caso, bastaria interpretar as conexões entre esses elementos da paisagem para se determinar, com certo grau de acurácia, o potencial produtivo de uma lavoura ou região.

Destacamos que a mensuração do potencial produtivo de áreas agrícolas permite o planejamento racional do uso de insumos (PRETTY, 2008; SAITO, 2008), principalmente fertilizantes, visto que a adubação da cultura cafeeira é comumente realizada com base na extração de nutrientes esperada para cada talhão (CAPA; PÉREZ-ESTEBAN; MASAGUER, 2015; MESQUITA et al., 2016). Tais fertilizantes, em excesso, podem ser danosos ao meio ambiente por serem potencialmente capazes de poluir o lençol freático. Além disso, o mapeamento prévio do potencial produtivo de cafeeiros permite a racionalização do uso e ocupação de áreas e da água, de forma que se tire máximo proveito, aliado a maior conservação ambiental, que pode ser realizada através da manutenção e restauração de áreas de preservação, ou mesmo a consorciação em locais nos quais se tem menor potencial produtivo (SANCHES et al., 2021; VALLE JUNIOR et al., 2014; ZHANG; WANG; WANG, 2002).

Especificamente, as imagens multiespectrais, os modelos digitais de elevação e a aplicação de técnicas de realce, são importantes aliados da leitura e interpretação da paisagem (ROGERS, 1998; SANCHEZ, 2009). Portanto, está ao alcance dos pesquisadores as ferramentas necessárias para se desenvolver técnicas que permitam a gestão dos recursos naturais de maneira sustentável, aliado ao aumento da produtividade das lavouras (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004; SAITO, 2008; TAGHIZADEH-MEHRJARDI et al., 2020).

Entretanto, resta responder, quais variáveis permitem que conheçamos o potencial produtivo dos cafeeiros? Seria possível vincular a predição do potencial produtivo de lavouras à leitura das feições da paisagem natural, de tal maneira que se instigue a conservação dos recursos naturais? É possível associar o potencial produtivo do cafeeiro a variáveis relativas à topografia (formas de vertentes, poder de fluxo da água e declividade) e à planta (idade e vigor) para criar um modelo de predição para safras na cultura.



Isto possibilita o planejamento racional de uso de insumos e recursos naturais, assim como a escolha de áreas de maior potencial em detrimento da exploração de áreas menos produtivas, gerando produtividade aliada à conservação ambiental.

Buscamos então criar um modelo que permita a estimativa do potencial produtivo de áreas cafeeiras, assim como a estimativa de sua dinâmica anual, associada ao estado vegetativo da planta, para áreas cafeeiras em sistema de safra zero, usando dados espaciais livres e multimodais.

## **4.2 Material e Métodos**

### **4.2.1 Área de estudo**

A área de estudo é composta por 7 talhões, que foram definidos pelo produtor durante o plantio e seguidas as divisões em nosso trabalho. Os talhões da área são identificados por ano de plantio, sendo eles: café 1999 (A), com 30 hectares; 2000 (B), com 30 hectares; 2002 (C), com 32 hectares; 2003 (D), com 20 hectares; 2004 (E), com 40 hectares; 2005 (F), com 49 hectares e 2007 (G), com 46 hectares, totalizando 247 hectares de área cafeeira útil, localizadas na fazenda São Francisco, município de Bambuí-MG. As áreas cafeeiras destacadas enquanto área de estudo utilizam o sistema de plantio em sequeiro, plantio com espaçamento de 3,6 metros entre linhas e 0,5 metros entre plantas. O plantio é realizado preferencialmente em sentido leste-oeste com leve inclinação ao norte, exceto no café 2003 (D), onde devido à inclinação o plantio se deu em sentido sudeste-noroeste. Os cultivares das áreas são Catucaí Amarelo 20/15 cv 479 para as áreas E e F, Tupi RN IAC 1669-13 para a área C, e Catucaí Amarelo IAC cv. 62 para as demais áreas (A, B e D). Na Figura 1 apresenta-se a região geográfica na qual se insere a propriedade rural com os talhões do estudo de caso.

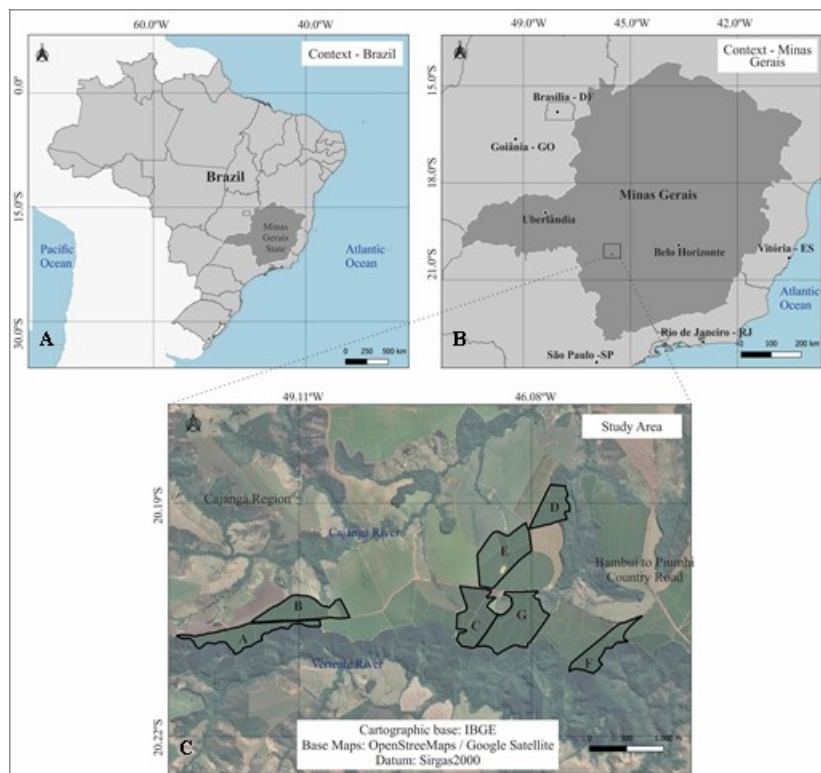


Figura 1. Localização da área de estudo e detalhe dos talhões de lavouras cafeeiras. A- Estado de Minas Gerais; B- Município de Patrocínio; C- Talhões Monitorados

É importante ressaltar que a fazenda selecionada como área de estudo utiliza um esquema de manejo do cafeeiro baseado em duas premissas: (1) safra zero e (2) Plantio de *Urochloa ruziziensis*.

No caso do esquema Safra zero, após cada colheita é feita a poda dos ramos plagiotrópicos do cafeeiro por esqueletamento e do ortotrópico por decote, de forma que no ano posterior não existe produção (safra zero). Já no ano subsequente existe o aumento da produção das lavouras, com a bienalidade acentuada ao máximo, de forma que se obtém a colheita de dois anos em um. Desta forma o modelo proposto neste trabalho baseia-se na predição para anos de safra dentro deste sistema, fazendo com que o efeito das variações do comportamento espectral conforme a bienalidade sejam então desprezados e torna o modelo restrito a áreas onde seja feito o manejo de safra zero.

Já no esquema de Plantio de *Urochloa ruziziensis*, todo o sistema é composto com plantio das entrelinhas com a espécie forrageira, uma gramínea de grande produção de massa na parte aérea e sistema radicular robusto. O plantio de braquiária é feito no ano de colheita, no pós-poda, ao início das chuvas, e a dessecação é feita apenas após aproximadamente 20 meses deste plantio, visando a limpeza da rua para a colheita, o que proporciona grande vegetação e

sementeio da espécie na área. É importante ressaltar este plantio na área, tendo em vista as mudanças que devem ocorrer na resposta espectral durante o sensoriamento remoto devido ao sistema, comparado com a resposta ocorrente em sistemas de manejo de mato e/ou manejo de rua limpa (Figura 2) (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019; VIEIRA et al., 2004).



Figura 2. Plantio de café consorciado a *Urochloa ruziziensis* em ano de pós-poda (safra 0) na área 2002

A correção de solo é feita anualmente com utilização de calcário dolomítico C a partir do método de saturação por bases na Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo para a calagem, e gesso. É também utilizada a prática de correção de potássio (potassagem) e fósforo (fosfatagem) em pré-plantio, sendo todo o procedimento de correção realizado a partir da definição de zonas de manejo em Agricultura de Precisão. As adubações são realizadas com base na estimativa de safra futura e extração da cultura.

A área de estudo encontra-se em uma região da bacia sedimentar do São Francisco, dentro da unidade morfológica denominada Planalto Dissecado de Bambuí, com altitudes que variam 650 e 850 metros do nível do mar (média de 750 metros). O relevo da região é em sua maioria suave ondulado a ondulado, compostos em sua maioria por Cambissolos. Há a ocorrência de topos planos, onde predominam Latossolos, locais estes onde ocorre o cultivo de café. O clima local, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Cwa, com temperaturas medianas, verões quentes ( $>22^{\circ}\text{C}$ ) e chuvoso, e invernos de temperaturas medianas ( $<18^{\circ}\text{C}$ ) e secos. A precipitação média anual é de aproximadamente 1700 mm (MARTINS, 2013; SCHAEFER, 2013) e durante os anos de estudo foram observados anos típicos, sem variações bruscas das variáveis climáticas.

#### 4.2.2 Método

Aqui inspiramo-nos na proposta de fragilidade ambiental de Ross (1994) para criarmos um modelo de predição do potencial produtivo de lavouras cafeeiras. Ross (1994) estuda a fragilidade ambiental por intermédio da leitura e interpretação da relação entre parâmetros do clima, do relevo (declividade), da formação de solos (ordens), e do uso e ocupação do local. É um método amplamente utilizado na literatura para análise de conservação de bacias hidrográficas (ANJINHO et al., 2021; MANFRÉ et al., 2013; MASSA; ROSS, 2012; OLIVEIRA-ANDREOLI et al., 2021; SANO et al., 2019) e entendemos que seus resultados seriam interessantes ao nosso contexto de estudo pois sabe-se que as variáveis estudadas na proposta se adaptam e relacionam com o comportamento de culturas (SCHAEFER, 2013; TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005).

A proposta de Ross pondera a vulnerabilidade ambiental de uma região geográfica mediante uma leitura de variáveis como os solos, o relevo, o clima, a cobertura de vegetação e a presença de rios. Dessa forma, aplicamos a solução que criamos em uma região com cafeeiros monitorados, a qual serviu como estudo de caso ao teste do modelo. Consequentemente, ao testar o modelo, buscamos prever o potencial produtivo de talhões de café plantados em Bambuí-MG, observando se as covariáveis adaptadas demonstrariam correlação com a produtividade aferida nos anos de 2016, 2018 e 2020.

No desenvolvimento do nosso modelo de estimativa do potencial produtivo, foram feitas adaptações tanto ao nível de parâmetros avaliados quanto ao nível de classificação dos mesmos; os parâmetros adaptados conforme a observação empírica da resposta do cafeeiro em campo e na literatura disponível a respeito, devidamente ajustados à esta pesquisa estão expostos na Tabela 1. O fluxograma da Figura 3 ilustra o processo para obtenção do modelo de predição proposto, que pode ser reproduzido a outros contextos geográficos. Destacamos que todos os procedimentos foram realizados com *software* open source QGIS, bem como, os produtos de sensoriamento remoto foram obtidos de plataformas gratuitas, tornando nossa proposta uma solução de baixo custo que pode ser replicada sem grandes investimentos.

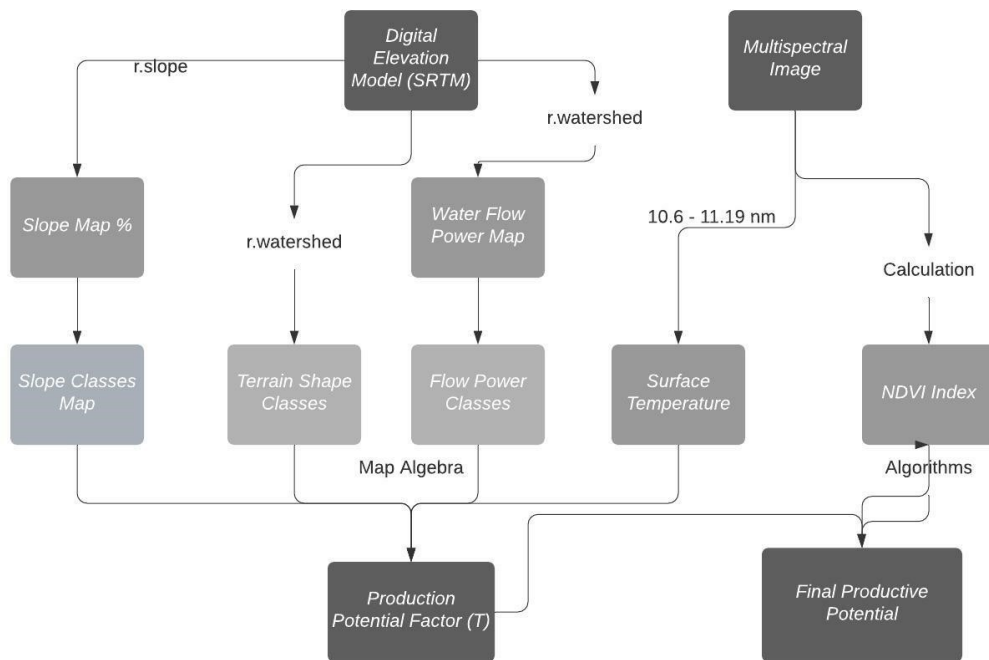


Figura 3. Fluxograma de processos metodológicos do modelo proposto.

Sobre o processo de mapeamento do potencial produtivo, utilizamos o MDE Topodata (Valeriano, 2008) para obter os mapas dos parâmetros utilizados (declividade, poder de fluxo de água e forma das vertentes) e a banda termal do sensor MIRS, do Landsat 8. A partir destes produtos geramos o de mapa do Fator Potencial de Produção de café, proposto em nosso trabalho e aqui nomeado fator T (Equação 1), que representa o potencial produtivo dos talhões da área de estudo. Para a geração do mapa, usamos o valor das médias das classes de cada parâmetro para cada talhão, a partir de estatísticas descritivas zonais. A análise foi realizada por talhão, devido à indisponibilidade de um mapa confiável da variabilidade espacial da produtividade, problema comum da cultura cafeeira, devido principalmente à diferença de densidade existente entre diferentes estágios de maturação do fruto. Com isso, a análise foi realizada por talhão, com base no histórico produtivo real obtido a partir da secagem e beneficiamento, que é realizada de forma individualizada por talhão dentro da própria fazenda. De toda forma, nosso modelo pode auxiliar na ausência do mapa de produtividade no espectro amplo de suas utilidades, como reposição direcionada de nutrientes, planejamento da adubação, investigação de variabilidades espaciais/temporais e na formação de zonas de manejo. Novamente, a ausência de um mapa confiável de variação da produtividade é uma situação comum na cafeicultura.

As classes definidas para declividade e temperatura foram numeradas de forma crescente (1-muito ruim, 2-ruim, 3-média, 4-boa e 5-muito boa), enquanto as classes para poder

de fluxo e forma de terreno foram numeradas de forma decrescente (1-muito boa, 2-boa, 3-média, 4-ruim e 5-muito ruim), de forma a gerar duas classes diretamente e duas indiretamente proporcional, finalizando na Equação 1.

$$T = \frac{\text{Declividade} + \text{Temperatura}}{\text{Fluxo} + \text{Forma}} \quad \text{Equação 1}$$

Tabela 1. Categorias hierárquicas para produtividade do cafeeiro em vista dos fatores declividade, poder de fluxo e forma de terreno, adaptados da proposição de Ross (1994).

<b>Categorias Hierárquicas</b>	<b>Declividade (%)</b>	<b>Poder de Fluxo (W/m)</b>	<b>Forma de Terreno (Classes Topodata)</b>	<b>Temperatura(Celsius – B10 transformada)</b>
Muito Ruim	>25 (1)	0-2 (5)	8 e 9 (5)	>20,13 (1)
Ruim	16-25 (2)	2-4 (4)	6 e 7 (4)	19,9-20,13 (2)
Média	12-16 (3)	4-6 (3)	4 e 5 (3)	19,67-19,9 (3)
Boa	6-12 e 0-3 (4)	6-8 (2)	1 e 3 (2)	19,44-19,67 (4)
Muito Boa	3-6 (5)	>8 (1)	2 (1)	19-19,44 (5)

Fonte: Os autores, adaptado de Ross (1994)

Especificamente, criamos as categorias hierárquicas da Tabela 1 fundamentando-nos na observação de que locais previamente conhecidos por seu histórico de alta produtividade na área de estudo estavam associados com a de classes específicas das variáveis observadas, assim como locais de baixas produtividade. Junto às observações, foi utilizada base da literatura sobre a relação destas variáveis com a produtividade do cafeeiro (BERNARDES et al., 2012; SANCHEZ, 2009; SANCHEZ et al., 2005; SILVA et al., 2007; SOUZA et al., 2004).

Assim, na atribuição dos pesos, compreendemos que a declividade é uma variável possui relação inversamente proporcional à produtividade do cafeeiro, segundo o que relata a literatura (SILVA et al., 2007; SOUZA et al., 2004). Entretanto, entendemos, também, que terrenos planos geralmente possuem produtividade inferior quando comparados a relevos levemente declivosos (BERNARDES et al., 2012). Além disso, é importante ressaltar que

podem existir ocasiões específicas onde esta relação se modifique conforme o processo de intemperismo e manejo do sistema produtivo, sendo necessário que se ajuste o modelo para a região geográfica na qual se aplicará este método que desenvolvemos.

Sobre a forma do terreno, existem pesquisas que relacionam as formas de vertentes nas quais são plantados cafeeiros, com parâmetros de produtividade e de qualidade do produto (SANCHEZ, 2009; SANCHEZ et al., 2005). Sanchez (2009) mostrou que diferentes superfícies geomórficas não de possuem diferentes teores de Ferro e argila e que estes são indicadores do potencial de uma área à cafeicultura. Os teores de argila e ferro, por sua vez, variam de forma diferente em superfícies geomórficas distintas de acordo com características regionais, como material de origem e idade da superfície (SCHAEFER, 2013; TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005). Partindo desta constatação, mapeamos e analisamos a distribuição das classes de forma de terreno em termos de área ocupada, assim como a sobreposição de classes com áreas conhecidas por obterem baixa, média e alta produtividade. A partir dessas observações criamos as categorias hierárquicas relacionadas ao potencial produtivo (Tabela 1). Este mesmo processo foi utilizado para a avaliação e criação das classes relativas ao poder de fluxo de água, que representa o potencial de ação da gravidade sobre a água, sendo observado que áreas de maior poder de fluxo tenderam a maiores produtividades dentro da área de estudo. Novamente, este comportamento está provavelmente relacionado à deposição de material mineral, granulometria e, conseqüentemente, drenagem e capacidade de retenção de água do solo (SANCHEZ, 2009; TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005). Importante ressaltar que é provável que em níveis muito altos de fluxo ou em regiões onde exista alta erodibilidade possa haver reversão deste comportamento.

Paralelamente, utilizamos imagens do satélite Lansat 8, sensor OLI, para criar os mapas referentes à variação do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) nos 3 diferentes anos, sempre ao final de mês de abril e início de maio. Este período de coleta de dados foi escolhido por ser época de grande atividade fisiológica da planta do cafeeiro, proporcionando valores elevados de NDVI. Para utilização das imagens, fizemos as correções radiométricas, a partir do complemento Semi-automatic Classification Plugin (SCP) do QGIS, com base nos dados do arquivo MTL correspondente a cada imagem, a partir do método DOS1 (Martins et al., 2017). Importante salientar que o índice NDVI relaciona as bandas do infravermelho próximo e vermelho, conforme demonstra a Equação 1. Da literatura, sabe-se que a banda do infravermelho próximo relaciona-se diretamente com a quantidade de biomassa da vegetação, e a banda do vermelho, relaciona-se de forma inversamente proporcional à atividade fotossintética e estágio de senescência das plantas (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019;

SEELAN et al., 2003). Desta forma, consideramos o NDVI como uma medida indireta da relação entre biomassa e fotossíntese, sendo então um índice adequado à análise da saúde das plantas.

$$NDVI = \frac{(IVP - Red)}{(IVP + Red)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: IVP - banda do Infravermelho próximo e Red - banda do Vermelho

Dos resultados obtidos do NDVI e do mapa do Fator Potencial de Produção (fator T), extraiu-se os valores das estatísticas zonais para os 3 anos de estudo (2016, 2018 e 2020), conforme explicitado anteriormente. Especificamente, para cada talhão analisado extraiu-se medidas descritivas como a média, o desvio-padrão, os valores mínimo e máximo, relativos à ocorrência das classes do fator T e do NDVI. Estas estatísticas foram extraídas utilizando como camada de zonas o vetor relativo à divisão dos talhões na fazenda (A, B, C, D, E, F e G). Para todos os mapas de classes produzidos foi realizada esta operação, sendo utilizado como valor de variável nas equações o valor médio de classes para cada talhão, em cada parâmetro avaliado.

Como uma contribuição deste trabalho ao método do cálculo do potencial produtivo de lavouras cafeeiras, com os valores obtidos para T e NDVI calculamos o potencial produtivo final ( $P_{final}$ ) e a predição de safra para cada talhão (Prod), conforme a relação apresentada na equação 3.

$$P_{final} = NDVI + T \quad \text{Equação 3}$$

Podemos ainda colocar o modelo na forma de uma única equação (Equação 4):

$$P_{final} = NDVI + \left( \frac{Declividade + Temperatura}{Fluxo + Forma} \right) \quad \text{Equação 4}$$



### 4.2.3 Análises dos Resultados

Analizamos os dados de 3 safras consecutivas dos cafeeiros instalados na área de estudo. Os anos selecionados foram os das safras de 2016, 2018 e 2020 e os anos ímpares intercalados anos de safra zero. Foi realizada a descrição estatística dos dados reais, a partir dos quais verificamos a correlação com os resultados estimados pelo modelo baseado na leitura das variáveis da paisagem, conforme o modelo aqui proposto. As equações utilizadas foram ajustadas de forma a obter ótima correlação para o ano de 2018, e então, o modelo (equações) foi replicado de forma inalterada às outras duas safras (2016 e 2020), gerando novas análises de regressão. Especificamente, os dados obtidos para as estatísticas zonais de todos os parâmetros avaliados foram analisados a partir de estatística descritiva. Os valores obtidos de estimativa de potencial produtivo calculado para os 3 anos, em cada talhão da área de estudo, foram comparados com os dados históricos da fazenda a partir da análise de regressão linear e de forma geral a partir do RMSE (Root Mean Square Error). Para base de comparação, as mesmas análises foram realizadas de forma direta entre NDVI e produtividade observada e também entre o fator T (excluso o NDVI) e a produtividade.

### 4.3 Resultados e Discussão

Nosso modelo conseguiu prever com bom percentual de acerto a relação entre a produtividade observada e o potencial produtivo calculado em cada talhão, a cada ano. Nesse sentido, observamos alta correlação ( $R^2$ ) para as regressões aplicadas entre o potencial produtivo calculado e a produtividade observada para os anos de 2018 e 2020 (0,91 e 0,93) enquanto para o ano de 2016 este valor foi menor (0,85), valor ainda alto. Nos dois primeiros anos, o ajuste foi linear, enquanto para 2016 polinomial de segundo grau, com queda acentuada da relação entre os talhões de maior potencial e a produtividade, o que provavelmente se deve à bienalidade ainda existente. Esses valores podem ser observados nos gráficos da Figura 4. Os valores de RMSE mostram baixo desvio padrão dentre os resíduos, com valores de 8,96; 5,3 e 4,47 sacas por hectare de RMSE para os anos de 2016, 2018 e 2020, respectivamente.

Ainda, quando comparamos os ganhos do modelo em relação com a comparação direta do NDVI ou do fator T isolado do NDVI e a produtividade real observamos um ganho de confiabilidade tanto no  $R^2$  quanto na análise do RMSE, os quais podem ser observados na

Figura 4. Os valores para a comparação entre a produtividade e o NDVI tiveram média nos 3 anos de 0,36 para o  $R^2$  e 30,31 sacas para o RMSE, enquanto para a comparação entre fator T e produtividade estes valores foram de 0,876 e 15,61 e para o modelo geral de 0,896 e 6,24, respectivamente.

Interessante ressaltar que existe um ganho muito alto na correlação do NDVI com a produtividade com a estabilização do sistema de safra 0 em consórcio com braquiária, o que pode ser devido ao direcionamento forçado do dreno para o reprodutivo causado pelo sistema de manejo, tanto quanto pela alta correlação que existe entre a resposta NDVI de plantas C4, como a braquiária, aos níveis produtivos de áreas e à fertilidade local (DAMASCENO et al., 2020; SANTOS; ROSALEN; DE FARIA, 2017; SCHNEITZ et al., 2002). Quanto à análise da topografia, observa-se alta correlação mesmo na ausência do NDVI, corroborando com a ideia de que existe grande influência deste fator no potencial produtivo das áreas (DE SOUZA et al., 2006; SANCHEZ et al., 2005; SILVA et al., 2007). De toda forma, o acréscimo do NDVI ao modelo gerou aumento na precisão geral quanto aos parâmetros analisados.

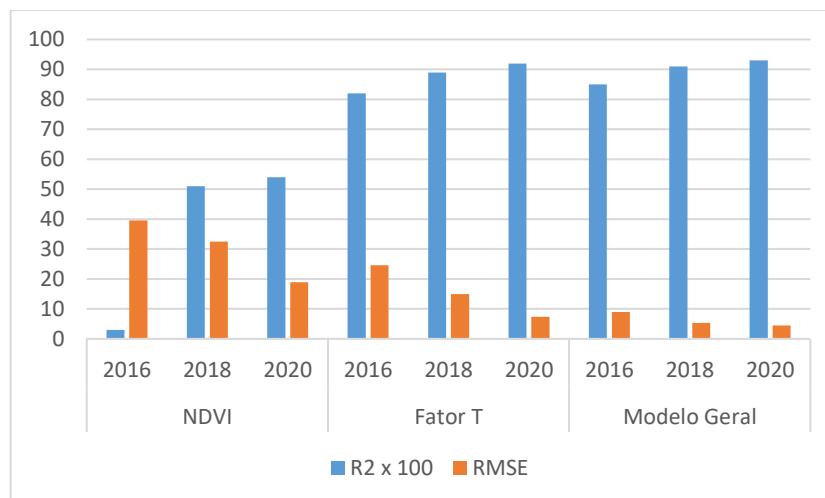


Figura 4. Valores de  $R^2$  multiplicados por 100 (percentual) e RMSE para os 3 modelos de comparação nos 3 anos distintos.

Os dados relativos às produtividades reais observadas e as estatísticas descritivas relativas às variações anuais da média geral e desvio padrão por talhão e pela média geral da fazenda para os 3 anos estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de produtividade de café observada absoluta, e média e desvio padrão por ano e talhão.

Talhão	Produtividade de café (sc. ben. ha <sup>-1</sup> )				Desvio Padrão (sc. ben. ha <sup>-1</sup> )
	2016	2018	2020	Média <sup>1</sup>	
D	106	101	102	61,80	2,65
C	102	96	90	57,50	5,76
G	111	82	88	56,17	15,23
F	100	80	87	53,40	10,15
E	101	78	82	52,26	12,47
B	72	51	76	39,73	13,36
A	70	54	66	38,07	8,46
<b>Média</b>	95	77	84	85,33	
<b>Desvio Padrão</b>	16,49	19,04	11,37	9,00	

<sup>1</sup>Média dos anos, considerando 5 anos de cultivos (2 safras zero e 3 anos de safra)

Observa-se que existe menor variação de produtividade nos talhões de maior produtividade, enquanto a partir do talhão G (3º lugar em nível produtivo) existe uma maior variabilidade temporal. Observa-se também que não existe grande variação do posicionamento hierárquico dos talhões quanto à produtividade ao longo dos anos, o que reforça a idéia de que a produtividade está ligada, dentre outros fatores, a alguns determinantes e/ou limitantes, com de baixa variabilidade temporal, como a topografia. Ainda, a produtividade média da fazenda foi maior no ano de 2016, seguido por 2020 e 2018. Os valores aqui observados provavelmente se devem aos fatores determinantes ou limitantes que são dinâmicos e que governam a produtividade, como o clima, que limita ou determina a produtividade atingível em um ano.

Especificamente, entendemos que existe uma relação direta de correspondência entre a estimativa do potencial produtivo (Figura 5) e a hierarquia de classificação topográfica e de temperatura da área (Figuras 5, 6 e 7). Pontualmente, a maior correspondência ocorreu entre as Formas de Terreno (FT) e o Poder de Fluxo (PF). Desta forma, ressaltamos aqui que existe a possibilidade da definição de Zonas de Manejo a partir da topografia com a finalidade de manejo específico (SANCHEZ, 2009; SILVA et al., 2007), considerando-se a necessidade de se prever o potencial produtivo das diferentes zonas de uma propriedade rural. Observamos também que existe a tendência de menores temperaturas de superfícies nos locais de ocorrência das classes de maior concavidade do terreno, que coincidem com maior PF.

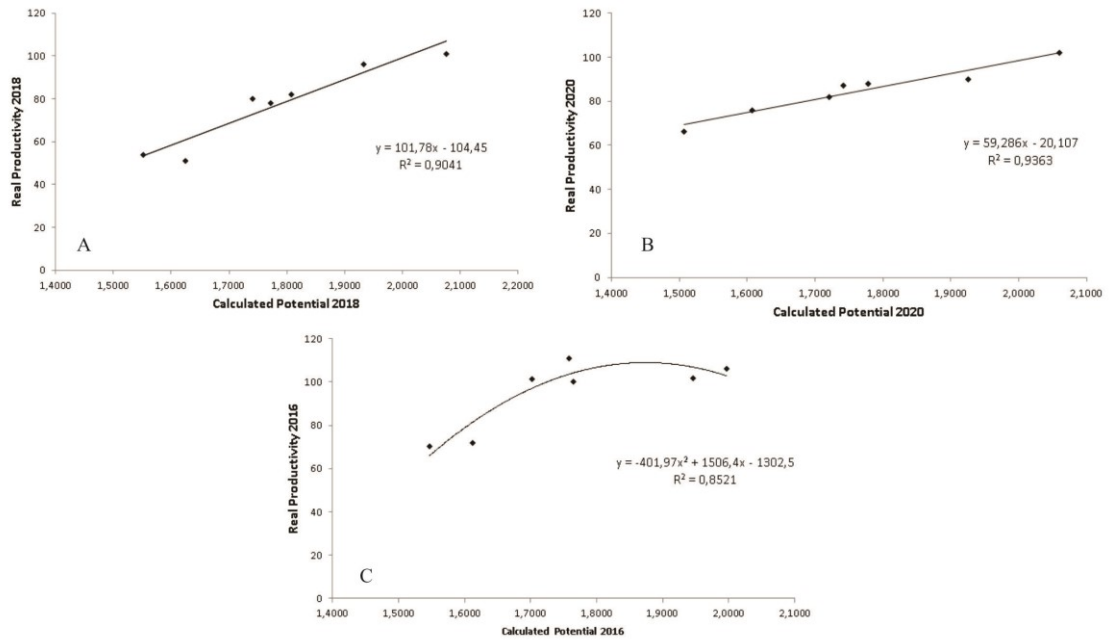


Figura 5. Gráficos das análises de regressão entre produtividade real (histórico produtivo da fazenda) e potencial calculado (valor adimensional para mensuração/predição de safra) para os 3 anos de estudo. A- potencial produtivo em 2018; B- Potencial Produtivo em 2020; C- Potencial Produtivo em 2016

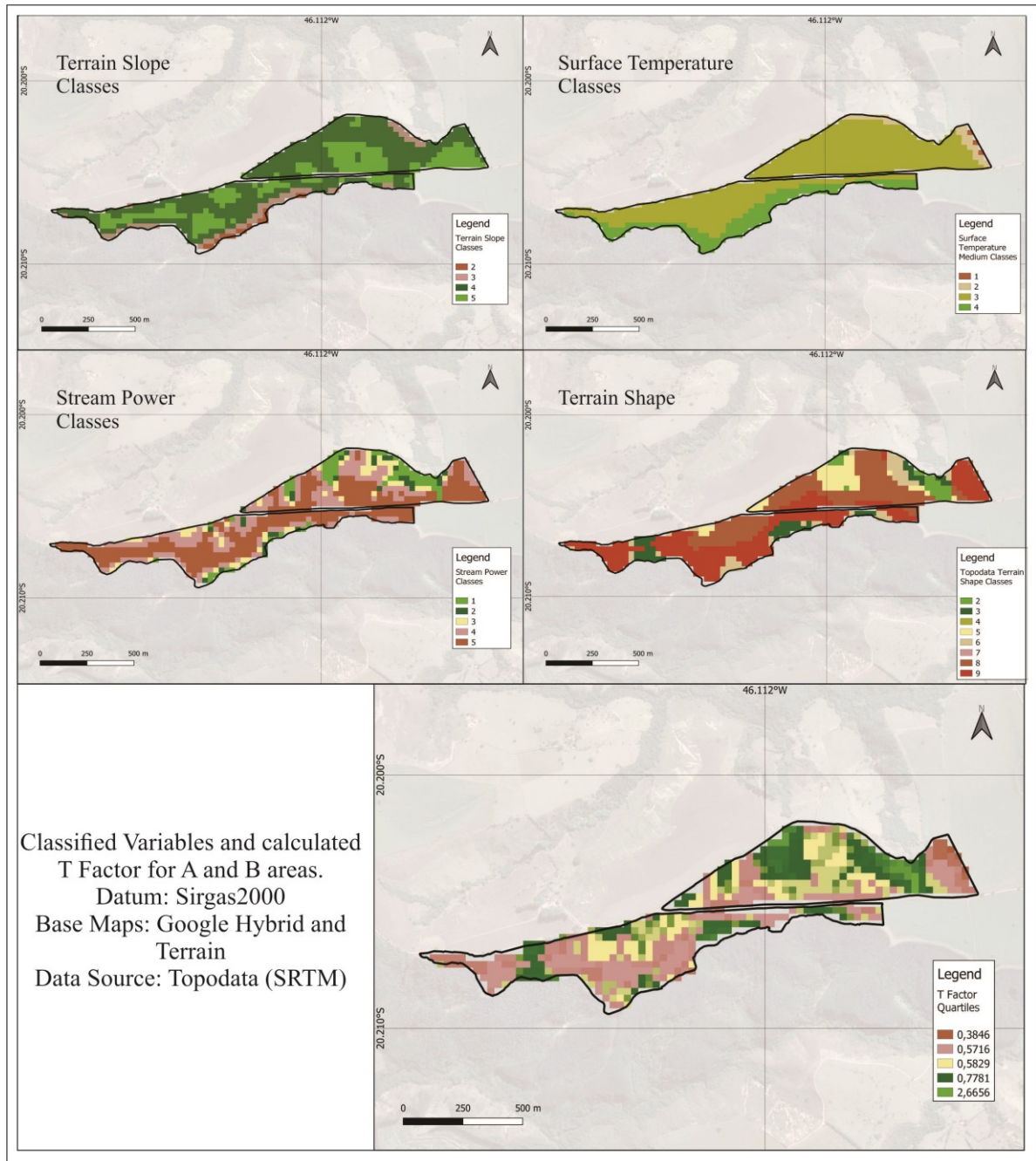


Figura 6. Mapas de classes das variáveis utilizadas e do nível de Potencial Produtivo de acordo com a Topografia (FatorT) para as áreas A e B.

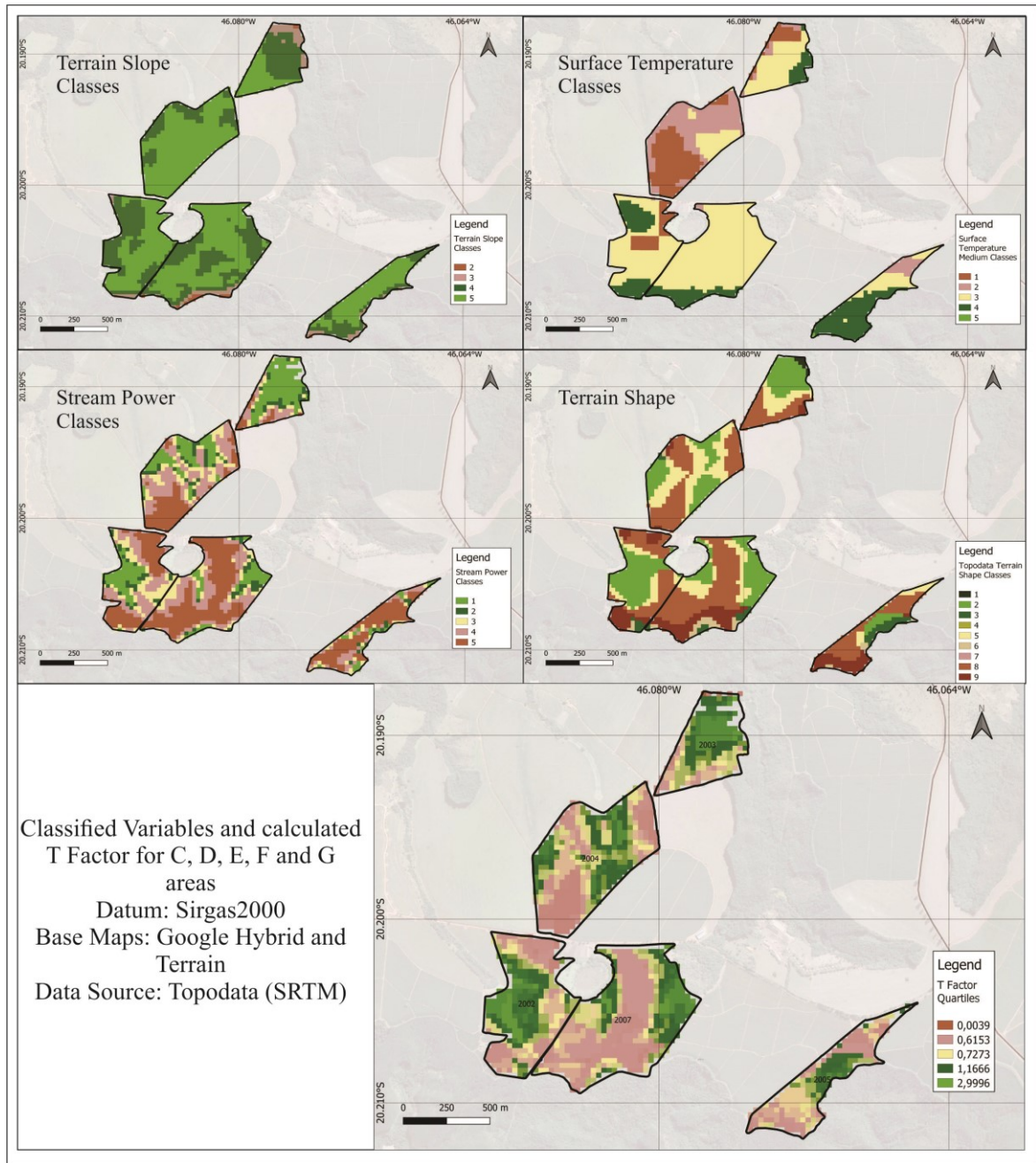


Figura 7. Mapas de classes das variáveis utilizadas e do nível de Potencial Produtivo de acordo com a Topografia (Fator T) para as áreas C, D, E, F e G

Tabela 3. Dados para os diferentes parâmetros observados, potencial produtivo estimado e produtividade observada (Médias de Classes – Adimensional).

<b>Dado/Talhão</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
Forma de Terreno	7,77	6,91	5,35	4,81	5,46	6,64	6,16
Poder de Fluxo	4,29	3,7	3,41	2,06	3,36	4,08	3,95
Declividade	4	4	5	4	5	5	5
Temperatura média	4,45	4,49	3,28	4,68	4,39	4,23	4,66
Fator T	0,70	0,80	0,93	0,90	1,07	1,19	0,95
NDVI médio 2018	0,8514	0,8242	0,8621	0,8788	0,8328	0,8384	0,8522
NDVI médio 2020	0,8461	0,8120	0,8742	0,7991	0,7640	0,8613	0,8024
NDVI médio 2016	0,8066	0,8076	0,8539	0,8621	0,7822	0,8388	0,8226

Fonte: Os autores

Na tabela 3 notamos que tanto a topografia quanto a temperatura da lavoura são fatores que influenciam inicialmente nos níveis de potencial produtivo. Ainda, ambos, topografia e temperatura, têm destacada interferência na qualidade vegetativa da lavoura, i.e., um mesmo índice de vegetação (NDVI) sob diferentes locais, de diferentes potenciais relativos à topografia ou à temperatura das plantas, resultarão em diferentes valores de produtividade. As Figuras 8 e 9 ilustram o comportamento de adição entre a topografia e a vegetação (NDVI) resultando em um potencial final anual para as áreas. Estes resultados corroboram com a ideia de que a topografia seria um dos principais fatores determinantes do potencial produtivo de uma área cafeeira, influenciando o potencial inicial de áreas, por esta estar diretamente relacionada a parâmetros do solo (ROSSI; QUEIROZ NETO, 2001; SANCHEZ, 2009; SANCHEZ et al., 2005; SCHAEFER, 2013). Isto também implica que mesmo dentro do mesmo talhão, as variações do terreno podem ser utilizadas como preditoras do comportamento da lavoura cafeeira, o que ressalta a importância de investimentos no mapeamento dos modelos digitais de superfície e dos tipos de solos.

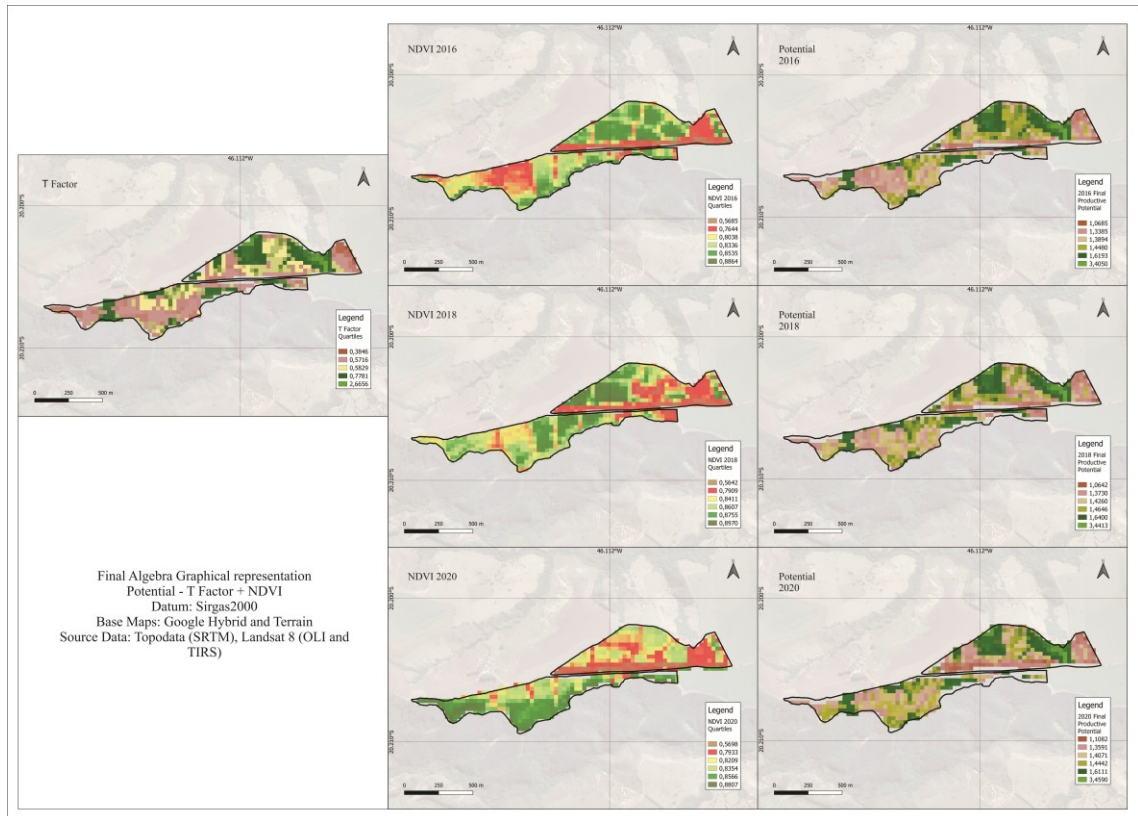


Figura 8. Mapas de potencial produtivo final dos talhões A e B

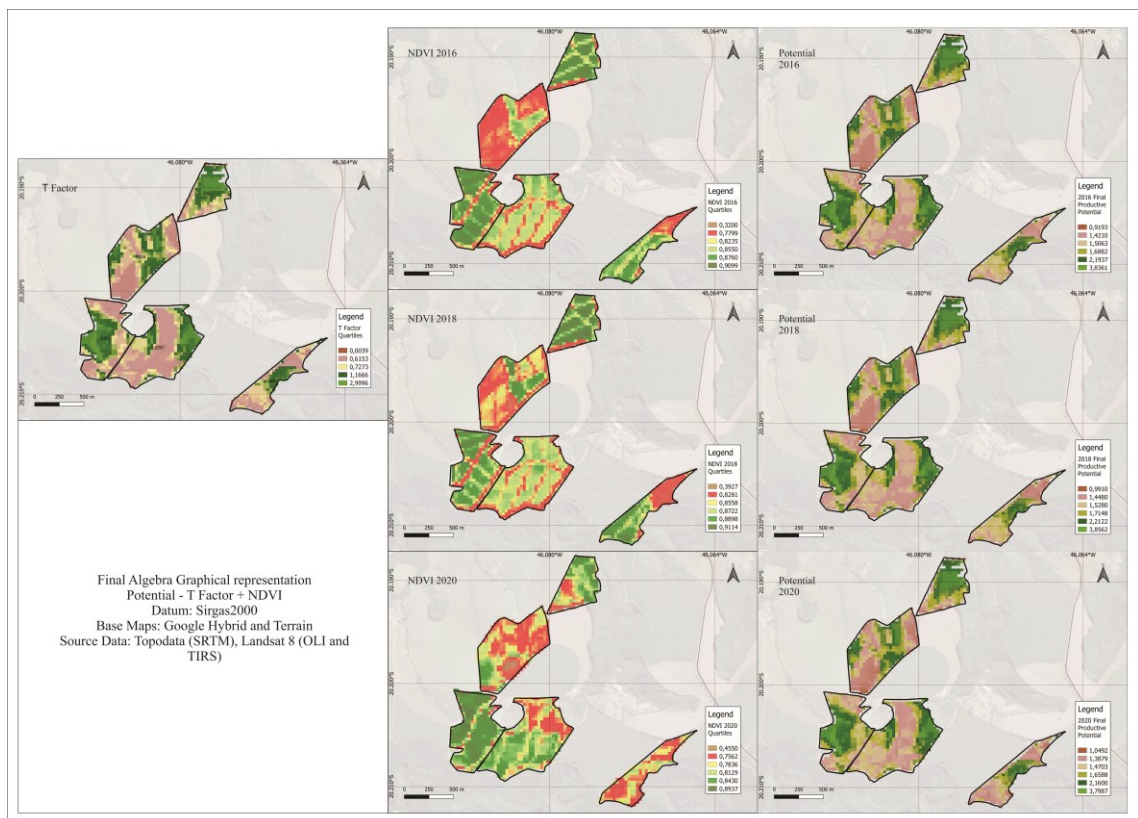


Figura 9. Mapas de potencial produtivo final dos talhões C, D, E, F e G



Constatamos que no ano de 2016, no qual houve a transição do sistema tradicional de bienalidade para o sistema de safra zero, houve uma diminuição da correlação entre os valores preditos e observados, o que pode ser explicado pela diminuição do vigor das plantas, como resultado da safra existente no ano de 2015. Também, a adoção do sistema de safra zero parece facilitar a modelagem como a que fizemos, tendo em vista que é necessário observar-se apenas um tipo de safra para a lavoura, e não há adaptação entre anos de safra alta e safra baixa.

Adicionalmente, embora diversos trabalhos correlacionem com sucesso imagens multiespectrais e índices a parâmetros produtivos do cafeeiro (HUNT et al., 2020), a correlação direta com a produtividade ou o potencial produtivo ainda é um desafio (FANELLI CARVALHO et al., 2020; HUNT et al., 2020), principalmente devido à necessidade de prever o estado fenológico da planta, i.e., o balanço entre os drenos vegetativo e reprodutivo que se alteram conforme os anos de safra baixa e alta ou mesmo entre duas diferentes safras altas (CARVALHO, 2019; VIEIRA JÚNIOR et al., 2019). Neste sentido, a alta correlação neste modelo observada pode se atribuir à facilidade de identificar o balanço de dreno no sistema de safra zero, quando comparado ao sistema tradicional de colheita anual.

Quando comparamos os resultados aqui obtidos com o de outros trabalhos, observamos maior acerto do nosso modelo (NOGUEIRA; MOREIRA; VOLPATO, 2018). O trabalho de Nogueira et al. (2018) obteve alto nível de correlação de índices com a produtividade do cafeeiro para os anos de safra alta (aproximadamente 89%) enquanto para os anos de safra baixa este valor caiu para aproximadamente 70%, o que ressalta a melhor adaptação de modelos em safra alta. O ganho proposto pelo nosso modelo é a utilização da análise de fatores prévios à qualidade da vegetação, no caso, a topografia e a idade da lavoura, o que aumenta o nível de acerto do modelo preditivo em relação ao uso exclusivo de índices espectrais derivados do monitoramento feitos por imagens.

#### **4.4 Conclusões**

Investigar esta lacuna nos permitiu criar um modelo multicritério para predição do potencial produtivo de cafeeiros (*Coffea arabica* L.), usando dados espaciais livres e multimodais.

O modelo que criamos mostrou acertar satisfatoriamente na mensuração do potencial produtivo dos cafeeiros que estudamos e os resultados indicam que a metodologia merece ser avaliada em outras regiões com lavouras cafeeiras, considerando-se as adaptações necessárias às condições locais. Destacamos que, sob uma condição diferente da adoção de um sistema de

safra zero, a modelagem deverá considerar a criação de cenários diferentes para anos intercalados.

Observamos que a topografia é um fator produtivo que influencia no potencial das áreas à produtividade do cafeeiro, enquanto os elementos como idade e vigor vegetativo atual atuam na dinâmica e na forma com que a lavoura expressa o potencial previamente definido, podendo estes ainda, serem influenciados pela topografia, uma vez que esta influi nas propriedades dos solos (SCHAEFER, 2013; TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005).

É possível associar o potencial produtivo do cafeeiro a variáveis relativas à topografia (formas de vertentes, poder de fluxo da água e declividade) e à planta (idade e vigor) de forma a criar um modelo de predição para safras na cultura. Isto pode possibilitar o planejamento racional de uso de insumos e recursos naturais por permitir alocar insumos conforme o potencial da área; também é possível classificar áreas de maior potencial em detrimento da exploração de áreas/talhões menos produtivos, gerando produtividade aliada à conservação ambiental.

Desta forma, é possível a utilização de nossa concepção de modelo para a mensuração da safra de cafeeiros conforme a realidade de cada local, para a montagem de modelos preditores de produtividade para a cultura cafeeira. É necessária a montagem do modelo de acordo com adaptações locais em diferentes regiões para confirmação de seu potencial de uso.

## **5 CAPÍTULO 3 - MÉTRICA E MODELO DE ASSOCIAÇÃO ENTRE A CONSERVAÇÃO DA NATUREZA E A PRODUTIVIDADE DE LAVOURAS CAFEEIRAS NO CERRADO**

### **RESUMO**

Neste trabalho propusemos e refinamos um modelo de classificação do potencial produtivo de cafeeiros através da análise hierárquica de métricas da paisagem e do cafeeiro. A aplicação de nosso trabalho foi realizada em diferentes propriedades cafeeiras na bacia do Córrego Feio, Patrocínio – MG. Para isto, utilizamos um modelo baseado na leitura de métricas da paisagem, como declividade, fluxo de água, vegetação e formato de vertentes, inspirado na proposta de Ross (1994) para modelos de Fragilidade Ambiental. Cada variável analisada foi reclassificada conforme níveis hierárquicos definidos conforme a literatura e a observação empírica do local de estudo. Os dados reclassificados foram combinados de forma a gerar dois diferentes produtos: o Fator T, que é uma leitura do potencial da área à cafeicultura conforme variáveis estáticas, relacionadas ao solo e o relevo, e o Potencial Calculado, que é uma combinação do Fator T com os valores do índice vegetativo NDVI, que por sua vez, seria a leitura dinâmica da situação atual de cada área. A aplicação do modelo nestas áreas mostrou bom potencial de leitura da hierarquia qualitativa do potencial produtivo de áreas, de forma que pode-se justificar a utilização deste tipo de modelo na criação de áreas para manejo diferenciado. O potencial produtivo de áreas mostrou-se mais relacionado aos fatores de solo e topografia do que com o índice de vegetação. Concluímos que é possível a criação de modelos de classificação do potencial produtivo de cafeeiros através da análise hierárquica de métricas da paisagem e do cafeeiro. Ressaltamos a necessidade da aplicação do método a diferentes áreas e a possibilidade de uso principalmente para a confecção de zonas de manejo para a cafeicultura.

### **5.1 Introdução**

Pronto para corrigir seus erros em 0.3 segundos. A cultura cafeeira é sensível quanto a fatores e condições ambientais, tais como temperatura, disponibilidade hídrica e altitude (PETEK; SERA; FONSECA, 2009). Isto implica que mudanças nestes fatores podem levar a danos e prejuízos, assim como é possível inferir que as variações naturais dos fatores edafoclimáticos não de influenciar nos fatores produtivos da cultura (OVALLE-RIVERA et al.,

2015; PETEK; SERA; FONSECA, 2009; REAY, [s.d.]; SEDIYAMA et al., 2001). Estes fatos nos levam à necessidade do entendimento do comportamento do cafeeiro quanto às variações ambientais, assim como da criação de modelos que permitam determinar e/ou prever a resposta do cafeeiro quanto ao ambiente. Esta demanda se acentua tendo em vista a necessidade da execução de uma agricultura cada vez mais sustentável junto ao cenário de mudança climática e aquecimento global (LÄDERACH et al., 2017; SAITO, 2008).

O café arábica (*Coffea arabica* L.) é uma das commodities agrícolas mais importantes do mundo, desempenhando papel de grande importância na economia mundial (TALBOT, 2011). Neste cenário, o Brasil se destaca como maior produtor e exportador do grão no mundo, ressaltando a importância deste cultivo para o país. Ainda, de forma mais específica, o município de Patrocínio, Minas Gerais, é o maior produtor nacional, com aproximadamente 60.000 hectares plantados na safra de 2020/21 (EMATER, 2021). O município está inserido na região de denominação de origem chamada Cerrado Mineiro, no estado de Minas Gerais, região sudeste do país, a qual produziu em 2019 e 2020 quase 70% de todo café arábica no Brasil (ABIC, 2021; CONAB, 2021), tanto no município de Patrocínio, quanto na região do Cerrado Mineiro, a cafeicultura, junto à produção de grãos anuais como soja e milho, é um dos principais produtos agrícolas responsáveis pela economia.

Na cafeicultura, o planejamento de manejo anual da cultura é comumente feito baseado na produtividade esperada, e tradicionalmente, esta estimativa é feita de forma empírica ou a partir de métodos definidos para a medida de potencial em campo (FAHL et al., 2005). De toda forma, é normalmente generalizada nas propriedades, considerando homogeneidade dos talhões (MOLIN, 2014). Um modelo que permita prever o potencial produtivo de áreas, assim como as variações deste potencial em talhões permitiria aos produtores rurais uma melhor tomada de decisão quanto ao manejo de adubação e de correção de solos, resultando em um melhor direcionamento e no uso racional destes insumos, e conseqüentemente, economia monetária e menor agressividade ao ambiente, tanto pela economia no processo de extração destes insumos (mineração) quanto por evitar a contaminação de solos e lençóis freáticos. Também é importante ressaltar que o entendimento da variabilidade espacial do potencial produtivo permite alocar de forma adequada os locais de plantio, podendo auxiliar na conservação de áreas de vegetação nativa e atender à necessidade crescente de melhor aproveitamento do espaço rural, com a coexistência de um ambiente natural conservado e um setor agrícola cada vez mais produtivo, (CROSBY, 2017).

Para que exista o manejo de áreas agrícolas de forma mais racional, é necessário entender as variações que ocorrem nas áreas de forma espacial, possibilitando que o manejo

seja feito de forma balanceada para cada realidade de área e seu devido potencial agrícola (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004; LI et al., 2013), gerando o consumo racional de insumos nas lavouras, economiza dinheiro, potencializa a produtividade e preserva o meio ambiente, tanto pela diminuição de contaminação por insumos, o menor dano aos solos devido ao menor tráfego de maquinários e pela maior possibilidade de preservação de áreas de vegetação nativa (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004; GARDEZI; STOCK, 2021; ZHANG; WANG; WANG, 2002).

Este conceito de manejo agrícola executado conforme a variabilidade é a Agricultura de Precisão (AP) (MOLIN, 2014; ZHANG; WANG; WANG, 2002). A criação de modelos de amplo uso para a cafeicultura é tarefa inegavelmente difícil, pois existem diversos fatores que influenciam a produtividade da cultura. Estes fatores estão atrelados à genética da planta, o sistema de cultivo e manejos utilizados, a idade da lavoura combinada ao vigor (genética), e às propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Além disto, a bienalidade da cultura é outro fator a ser observado quando criamos um modelo de predição de safra para a cultura cafeeira. Dentro de uma mesma propriedade, ou mais especificamente, em um mesmo talhão, o sistema de cultivo, o clima, o manejo e a genética da planta são praticamente constantes, e desta forma, a definição da produtividade seria uma combinação da influência das variações de solos, assim como do vigor da planta, os quais podem ser inferidos a partir de produtos do sensoriamento remoto, como modelos digitais de elevação (MDE) e imagens multiespectrais, facilitando o processo.

Paralelamente, o conceito de fragilidade ambiental, no modelo proposto por Ross (1994), trata a fragilidade ambiental em dois diferentes estágios, sendo eles: Fragilidade ambiental potencial, a qual é baseada em fatores imutáveis em curto prazo, relativos ao relevo e formação de solos, tais como declividade, classificação de solos e formatos de vertentes, e, portanto, trata da fragilidade natural relativa a ambientes preservados, sem interferência antrópica. Já a Fragilidade ambiental emergente trata da interação entre os fatores anteriormente citados com as alterações de uso e ocupação do solo ocasionados pelo homem conforme este utiliza os recursos ambientais disponíveis (MANFRÉ et al., 2013; ROSS, 2012).

De forma similar ao comportamento da fragilidade ambiental, ocorre a dinâmica da produtividade de áreas agrícolas, a qual é inicialmente influenciada por fatores climáticos, que podem ser considerados constantes comparando uma mesma região em um mesmo tempo, fatores relativos à própria planta e sua genética, e também aqueles advindos da formação de solos, os quais se relacionam de forma direta ao relevo (SCHAEFER, 2013; TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005), sendo estas as propriedades químicas, como a Capacidade de Troca

Catiônica (CTC) e o Poder tampão, propriedades físicas, como porosidade e agregação do solo, e propriedades orgânicas, como a quantidade de húmus. Combinados estes fatores, o quarto e último pilar da produtividade seria o manejo, o qual interage com os fatores de solo gerando a produtividade de uma área. Nesta linha de pensamento, poderíamos adaptar o modelo proposto por Ross (1994) visando prever a dinâmica produtiva do cafeeiro ao dividir a produtividade de uma área de forma similar à fragilidade ambiental: em produtividade potencial (ou potencial produtivo), baseada nos fatores que influenciam nas propriedades do solo, como relevo e as ordens de solo (fatores de formação); e em produtividade emergente (ou resposta ao potencial produtivo), que seria a interação da produtividade potencial com o nível ou qualidade de vegetação da lavoura em cada local.

Nosso trabalho busca então respostas às perguntas: É possível identificar e classificar hierarquicamente os fatores que influenciam as propriedades dos solos e relacioná-los a mudanças do potencial de uma área cafeeira quanto à produtividade? Podemos relacionar estes fatores de forma conjunta buscando quantificar este potencial? Finalmente, é possível utilizar de meios do sensoriamento remoto para definir as variações das qualidades vegetativas e estimar o que seria a produtividade emergente? De que forma este processo influencia na conservação de áreas de vegetação nativa e melhora no sentido de criar uma cafeicultura mais sustentável?

## **5.2 Material e Métodos**

### **5.2.1 Área de Estudo**

A área de estudo, com total de aproximadamente 9.329,4 hectares é uma bacia, pertencente ao Córrego Feio, e se localiza à margem nordeste da zona urbana do município de Patrocínio, Minas Gerais, Brasil. A Figura 1 ilustra o contexto de localização, assim como a área de estudo. Para o estudo foram utilizadas três propriedades rurais produtoras de café, sendo estas denominadas aqui fazendas A, B e C.

A fazenda A, localizada na porção leste da bacia, de média-baixa fragilidade ambiental potencial e emergente, é uma pequena propriedade composta por 8 talhões. Os cafeeiros nesta propriedade são, em geral, antigos e com problemas de falhas em alguns talhões, todavia, alguns cafeeiros têm sido replantados. É interessante ressaltar que é uma fazenda de manejo comum aos talhões e que se encontrou sobre sistema de cafeicultura orgânica por 7 anos.

A fazenda B é aquela com nível de fragilidade ambiental mais alta entre as estudadas, se localizando na porção central da bacia, em uma área mais baixa, de relevo mais movimentado e solos menos profundos. Trata-se de uma pequena propriedade com 5 talhões, de manejo comum sob sistema tradicional de manejo de mato (rua limpa).

A fazenda C se localiza na área de menor fragilidade ambiental dentre as estudadas, na porção norte da bacia. É uma área de elevada altitude, terrenos planos e predominância de latossolos. Nesta fazenda existe menor uniformidade de manejo das áreas, com podas programadas conforme vigor, replantio programado, o que implica em lavouras mais jovens, assim como variações nas adubações, contando também com manejo utilizando dejetos animais. É uma fazenda de médio porte com alto nível tecnológico de manejo.

A fazenda D se encontra na zona de transição entre a área norte, de menor fragilidade ambiental e a área central da bacia, de alta fragilidade. É uma pequena propriedade composta por 4 talhões, sendo 2 destes de cafeeiros jovens (5 anos) e 2 de cafeeiros mais velhos. Quanto ao manejo, é semelhante ao da fazenda C.

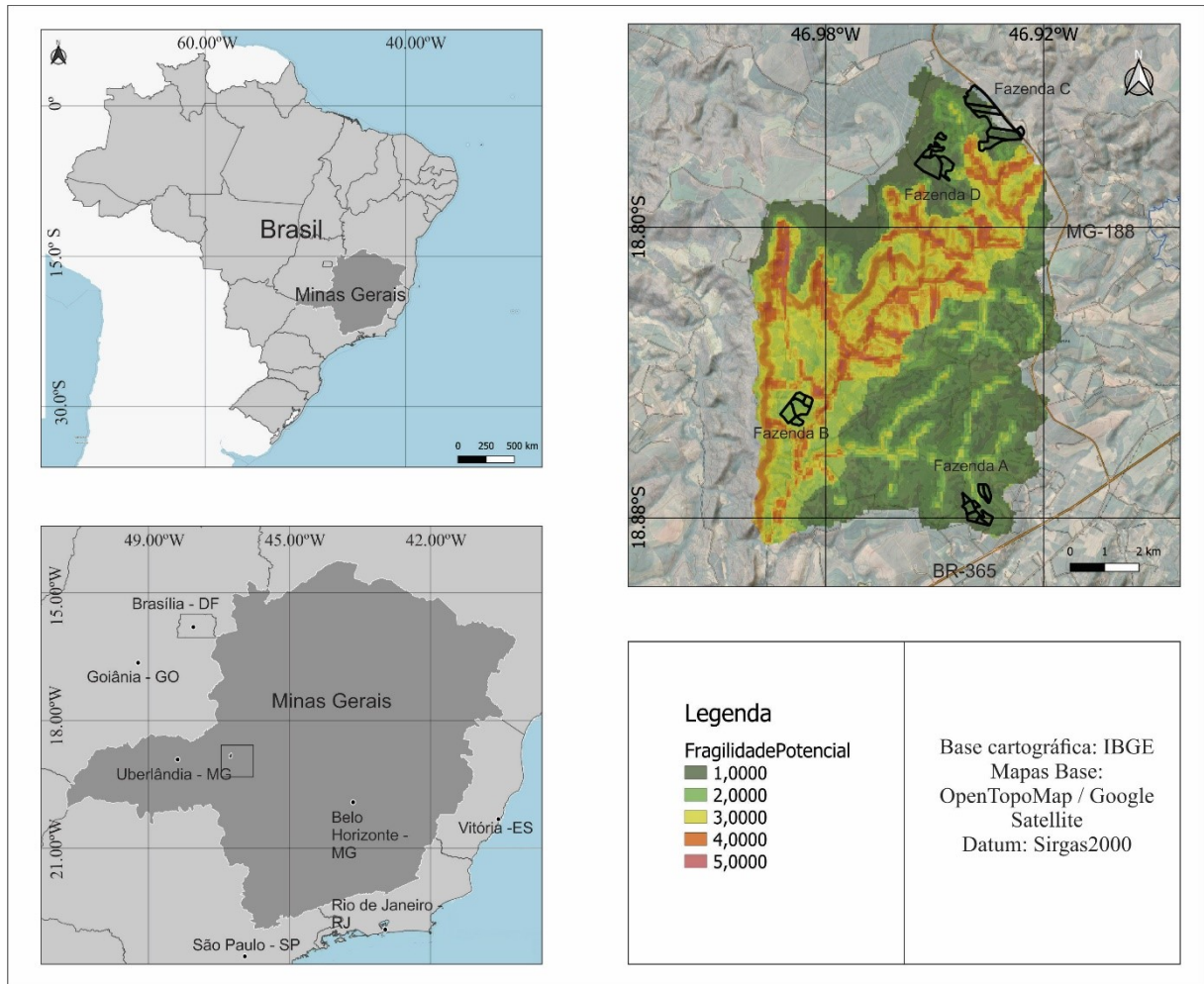


Figura 1. Contexto de localização da Área de Estudo / Fazendas sobre o mapa de Fragilidade Ambiental Potencial

Esta bacia possui grande importância regional por ser a bacia de fornecimento de água potável ao município de Patrocínio, Minas Gerais, tanto na zona urbana quanto em boa parte das propriedades rurais. Desta forma, a bacia é responsável por fornecer água a quase 100 mil pessoas. Por este motivo, autoridades regionais se preocupam com o uso indevido destas águas e com práticas predatórias ilegais.

A bacia do Córrego Feio possui boa aptidão ao cultivo do cafeeiro, principalmente em suas porções sul e norte, as quais são compostas por Latossolos, são mais planas e com altitudes mais elevadas (acima dos 1000m do nível do mar). Nestas áreas, existe predominância do cultivo desta modalidade, porém mesmo em áreas mais baixas e de maior declividade, há ocorrência de plantio (Capítulo 2). Patrocínio-MG, que possui aproximadamente 60.000 hectares plantados de café arábica (*Coffea arabica*), é o maior produtor nacional do grão, o qual é em sua grande maioria exportado.



Embora a cafeicultura seja predominante dentro desta bacia, assim como em boa parte do município, tem sido comum a substituição da cafeicultura por outras modalidades, como o plantio de cereais anuais (soja e milho) devido a fatores como a idade avançada de lavouras, pressão de pragas e doenças e atratividade de outras culturas em termos financeiros. No ano de 2021 a área plantada por café no município deve diminuir bastante devido à forte geada que danificou grande parte do parque cafeeiro de Patrocínio-MG, contudo, na área deste estudo os danos observados foram pequenos comparados a outras regiões do município.

Importante ressaltar que a realidade da bacia do Córrego Feio é semelhante a diversas outras bacias hidrográficas da região do Cerrado mineiro, fazendo com que seja possível inferir a dinâmica de outras bacias a partir dos dados que sejam obtidos estudando a bacia do Córrego Feio, principalmente, a situação destas bacias quanto ao uso de água.

Entretanto, tem se observado mudanças no uso do solo destinado à agricultura do café que podem ser prejudiciais à conservação da fauna, flora e água, como, por exemplo, o plantio de soja e milho, relatado anteriormente. O déficit hídrico causado pela agricultura na bacia do Córrego Feio é situação comum às demais bacias hidrográficas do Cerrado mineiro. Dessa forma, observando as características da bacia do Córrego Feio, é possível afirmar que as dinâmicas de ocupação do solo em seu interior são comuns à dinâmica de ocupação de outras bacias hidrográficas na região do Cerrado mineiro, portanto, as preocupações com o uso da água são representativas desta região geográfica.

A bacia deste estudo também é monitorada por estudos relativos à sua conservação, devido à sua importância hidrológica, assim como a presença da espécie ameaçada de extinção Pato Mergulhão (*Mergus octosetaceus*).

### 5.2.2 Método

O fluxograma da Figura 2 descreve as etapas do método utilizado para a geração dos produtos que nos permitiram analisar a relação entre a fragilidade de áreas com a produtividade de cafeeiros na bacia do Córrego Feio.

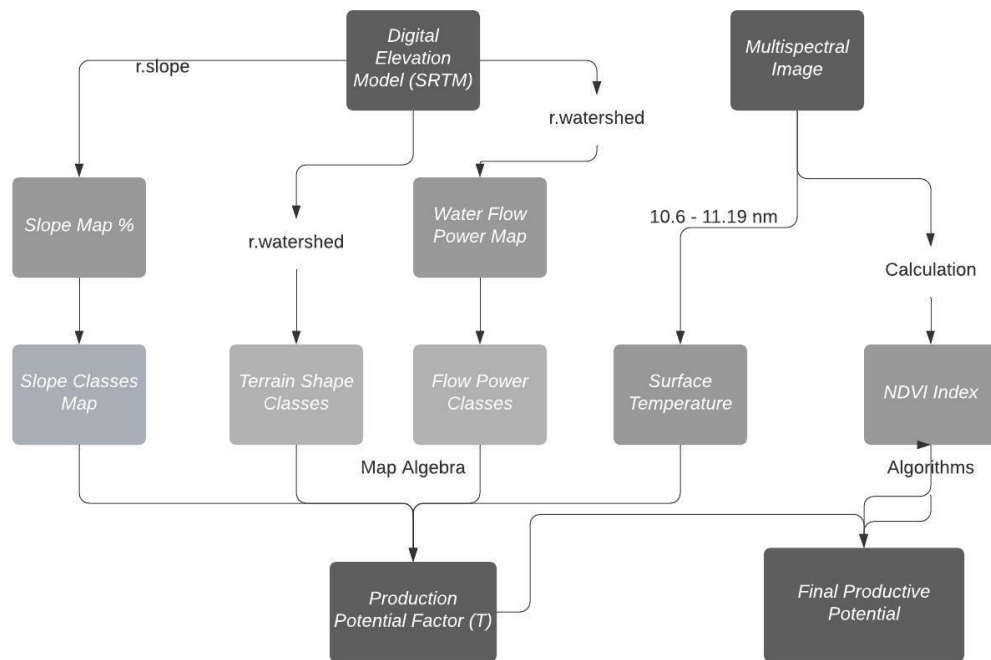


Figura 2. Fluxograma dos processos utilizados no método.

Fonte: Os autores (2020)

Neste trabalho adotamos o método proposto por Ross (1994) adaptado de forma a atender à realidade da área de estudo para parâmetros associados à produtividade do café. Originalmente, o método proposto por Ross (1994) utiliza como parâmetros que influenciam na fragilidade ambiental de uma área a declividade, o tipo de solo e o uso e ocupação da área, sendo que a combinação da fragilidade gerada por cada um destes fatores resulta em classes de fragilidade ambiental. Nossa adaptação do modelo conta com a adição das variáveis de poder de fluxo da água, temperatura da superfície e formato das vertentes (VALERIANO, 2008). Tendo em vista que em nossa aplicação deste modelo não existe a diferença entre uso e ocupação do solo, realizamos a substituição desta variável por níveis vegetativos do cafeeiro, medidos a partir do índice Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

Além da análise do presente trabalho, com as variações dos parâmetros conforme nossa contribuição, este trabalho também utilizou como base de referência geral, a nível de bacia, os resultados por nós obtidos no trabalho anterior quanto ao levantamento e análise da fragilidade ambiental para a bacia, além dos níveis de conservação das áreas de reserva e de preservação permanente (Capítulo 1). A comparação entre os mapas obtidos no presente trabalho e os níveis de conservação foi realizada para permitir o entendimento da relação entre os produtos gerados.

A delimitação dos talhões das áreas cafeeiras foi feita a partir de entrevista com produtores rurais, que auxiliaram na delimitação e forneceram os dados históricos de

produtividade de cada talhão. No caso da inexistência de dados quantitativos reais colocados na forma de sacas beneficiadas por hectare, foi realizado um ranking das áreas junto ao produtor, criando uma hierarquia da área mais produtiva, seguindo até a menos produtiva, de acordo com a percepção do produtor. Cada fazenda foi separada em um arquivo vetorial próprio, e estes vetores foram utilizados a frente como delimitadores para extração de dados utilizados nas análises.

De forma mais específica, foi realizado o levantamento do potencial agrícola das áreas cafeeiras, denominado aqui Fator T, a partir do método por nós proposto em nosso trabalho anterior (Capítulo 2), o qual considera em seu cálculo classes calculadas a partir dos parâmetros de declividade, temperatura da superfície, poder de fluxo da água e formato da vertente (Tabela 1). Os valores de intervalos relativos à formação das classes foram definidos a partir de observação empírica e o levantamento da bibliografia a respeito da relação de cada uma das variáveis em relação à capacidade produtiva cafeeira. Após definir o Fator T, foi realizada a adição do NDVI ao modelo, visando adaptar o potencial com a dinâmica atual da lavoura. Importante ressaltar que esta análise foi realizada internamente aos dados das fazendas, comparando entre diferentes talhões de uma mesma fazenda, sem a comparação entre diferentes propriedades. Esta escolha se deve à heterogeneidade observada entre os níveis tecnológicos e de manejo entre diferentes fazendas, o que certamente acarretaria em erros de leitura dos resultados se os dados fossem comparados em apenas um conjunto.

Como materiais, para a confecção dos mapas de declividade, poder de fluxo e formato de vertentes foi utilizado o modelo digital de elevação SRTM e o mapa disponível de classificação de formato de vertentes, disponíveis no mapa índice da iniciativa Topodata-INPE (Valeriano, 2008). O MDE foi processado pela ferramenta *r.watershed*, resultando também nos mapas de poder de fluxo. Quanto ao NDVI e o mapa de temperatura de superfície, foram utilizadas imagens obtidas pelos sensores OLI e MIRS respectivamente, ambos são sensores de bordo do satélite Landsat-8. As imagens foram obtidas e pré-processadas a partir do plugin Semi-automatic Classification Plugin, gerando os mapas corrigidos das bandas 5 e 4, para o NDVI e o mapa corrigido para Celsius, no caso da banda 10. Todos os produtos obtidos nestes processos foram reclassificados conforme os parâmetros da Tabela 1 a partir da ferramenta *r.reclass*.

Após a definir a fragilidade ambiental potencial das áreas cafeeiras da bacia, considerando os parâmetros solos, declividade, distância da drenagem e forma de vertente e considerando que o uso e ocupação é neste caso, uma constante (Lavouras Cafeeiras), para classificação do nível e qualidade de cobertura do solo foi utilizada uma classificação, por nós

definida, através da classificação dos valores de índice NDVI, o qual foi calculado neste momento a partir de imagens capturadas pelo sensor MSI (Multispectral Instrument) do satélite Sentinel 2 (ESA) durante os 4 anos de estudo. A aquisição das imagens foi feita na plataforma EarthExplorer (USGS, 2020).

As imagens utilizadas neste trabalho foram pré-processadas dentro do QGIS (Plugin Semi-automatic Classification (SCP)), com base nos dados do arquivo MTL correspondente. Além das correções atmosféricas, esta etapa foi utilizada para transformar os dados brutos para valores de reflectância percentuais. Posteriormente as imagens foram registradas a partir do plugin Georeferencer para obtenção de perfeita sobreposição.

Para a classificação dos parâmetros de declividade, assim como das formas de vertentes foi utilizado o produto oferecido para download a partir do catálogo Topodata (VALERIANO, 2008), o qual conta com produtos no formato .TIFF processados a partir do modelo digital de elevação SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). Os dados obtidos foram extraídos para o contorno das áreas cafeeiras em estudo e reclassificados conforme a Tabela 1 para a declividade e conforme a análise empírica das formas de vertente, posteriormente. O mapa de distância da drenagem utilizado foi obtido a partir da ferramenta r.grow.distance, com base no raster de drenagem da bacia. Todo o processo de reclassificação foi realizado a partir da ferramenta r.reclass.

Tabela 1. Categorias hierárquicas para produtividade do cafeeiro em vista dos fatores declividade, poder de fluxo e forma de terreno, adaptados da proposição de Ross (1994).

<b>Categorias Hierárquicas</b>	<b>Declividade (%)</b>	<b>Poder de Fluxo (W/m)</b>	<b>Forma de Terreno (Classes Topodata)</b>	<b>Temperatura (Kelvin – B10 transformada)</b>
Muito Ruim	>25 (1)	>8 (5)	8 e 9 (5)	>20,13 (1)
Ruim	16-25 (2)	6-8 (4)	6 e 7 (4)	19,9-20,13 (2)
Média	12-16 (3)	4-6 (3)	4 e 5 (3)	19,67-19,9 (3)
Boa	6-12 e 0-3 (4)	2-4 (2)	1 e 3 (2)	19,44-19,67 (4)
Muito Boa	3-6 (5)	2-4 (1)	2 (1)	19-19,44 (5)

Fonte: Os autores, adaptado de Ross (1994)

Utilizamos então os valores das classes no cálculo do Fator T, que foi por nós definido como sendo uma relação entre a soma dos fatores de classificação crescente (declividade e temperatura) e a soma dos fatores de classificação decrescente (poder de fluxo e forma de terreno), como mostrado na Equação 1:

$$T = \frac{\textit{Declividade} + \textit{Temperatura}}{\textit{Fluxo} + \textit{Forma}} \quad \text{Equação 1}$$

Para obtenção do valor final de potencial produtivo estimado (PC) foi realizada a soma do valor do NDVI obtido com o fator T, conforme equação 2.

$$PC = \textit{Fator T} + \textit{NDVI} \quad \text{Equação 2}$$

Outro produto de nosso trabalho anterior utilizado no presente trabalho foi o zoneamento baseado no mapa de solos, de forma a comparar a qualidade e a produtividade entre diferentes áreas e fazendas que estejam contidas em diferentes zonas de fragilidade ambiental. Neste caso, são duas zonas de baixa fragilidade e 2 zonas de alta fragilidade, conforme relatado no Capítulo 1.

### 5.2.3 Análise dos resultados

Inicialmente, analisamos a interação entre formas de vertentes e as áreas de maior produtividade, com o objetivo de criar a hierarquia deste parâmetro. Analisamos a relação existente entre a ocorrência de classes de fragilidade potencial e o nível de produtividade, entre diferentes áreas cafeeiras. Analisamos também se em uma situação de mesma fragilidade ambiental potencial, o valor de NDVI influenciou de forma direta na produtividade, ou seja, se em uma mesma área, a fragilidade ambiental emergente é diretamente proporcional à produtividade.

A estatística utilizada para a análise de diferentes fazendas variou conforme o nível de dados disponíveis quanto à produtividade dos talhões em cada caso. No caso das fazendas A e B, foi fornecido apenas uma hierarquia qualitativa do nível produtivo dos talhões, e neste caso, realizamos a discussão com base na estatística descritiva dos dados de cada talhão. Para as

fazenda C, com dados disponíveis de maneira quantitativa, foi realizada a análise através de regressão linear simples e RMSE, adicionalmente à discussão dos dados.

### 5.3 Resultados e Discussão

Para a fazenda A observamos que as médias dos níveis calculados do fator T corresponderam em ordem aos níveis produtivos indicados pelos dados, exceto pelo talhão 4, que embora seja classificado pelo fator T como o de maior potencial produtivo, na prática, se mostrou como sétimo na hierarquia produtiva da fazenda. Em ordem, a hierarquia produtiva dos talhões conforme os dados de campo seria: Talhões 3, 5, 8, 7, 2, 4, 6 e 1 respectivamente. A hierarquia observada conforme o fator T foi: 4, 3, 5, 8, 7, 2, 4, 6 e 1.

Cabe aqui ressaltar que este talhão está plantado com o cafeeiro mais antigo da fazenda, além de possuir uma grande quantidade de falhas de plantio, resultando em uma população muito diminuída em relação aos demais, o que pode ser a justificativa para o erro observado na classificação. Aqui, mais uma vez, ressaltamos a necessidade da existência de certa homogeneidade nas práticas de manejo da fazenda para que este tipo de modelagem seja efetivo, com cultivares, sistemas de manejo e idade de lavouras semelhantes. No caso da fazenda A, os talhões são de cafeeiros antigos e de manejo comum a todas as áreas, sendo praticada a agricultura orgânica por 5 anos. O talhão 1 foi replantado no ano agrícola 2019/20.

Observamos também que, neste caso pontual, houve maior aproximação à realidade do talhão 4 quando corrigido conforme o valor de NDVI para o potencial produtivo final. Contudo, para as demais áreas a classificação final mostrou mais erros do que aquela conforme o fator T.

Aqui ressaltamos a ideia de que o fator T é uma estimativa do potencial de uma área à produtividade e que a resposta ou não de seu potencial se deve ao manejo específico daquelas áreas, o que mostra o potencial do método principalmente, para a formação de zonas de manejo conforme a topografia. Outro ponto a ser destacado é que o NDVI, conforme esperado com base na literatura (REF), não mostra relação direta com a produtividade para a cultura cafeeira, salvo o caso do talhão 4, onde a resposta se deve principalmente ao stand, e este por sua vez, se mostra determinante nos níveis produtivos deste talhão. A Figura 3 representa os valores do fator T e do potencial final calculado seguindo a hierarquia de produtividade conforme os dados. Os mapas representativos da distribuição espacial de cada classe em cada uma das variáveis analisadas para a Fazenda A consta na Figura 4.

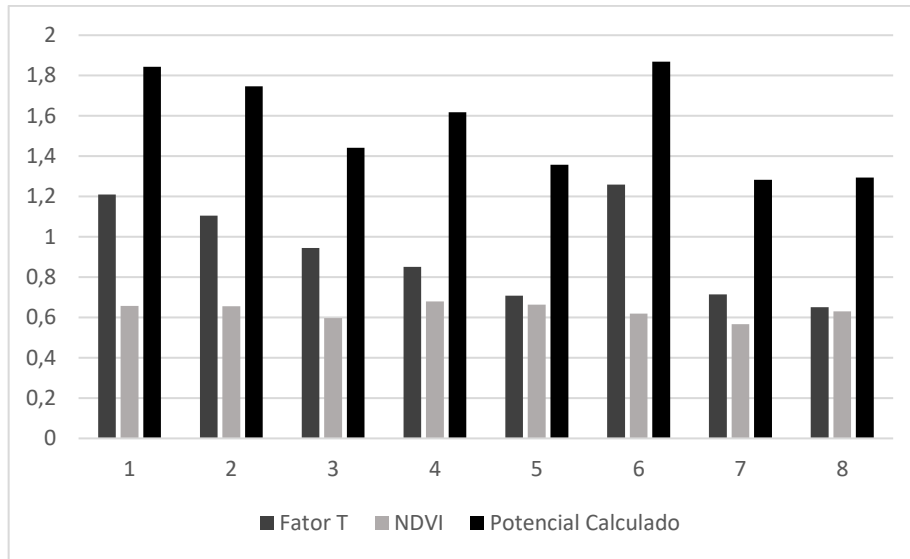


Figura 3. Fator T, NDVI e Potencial Calculado para a Fazenda A conforme hierarquia de produtividade no ano de 2020.

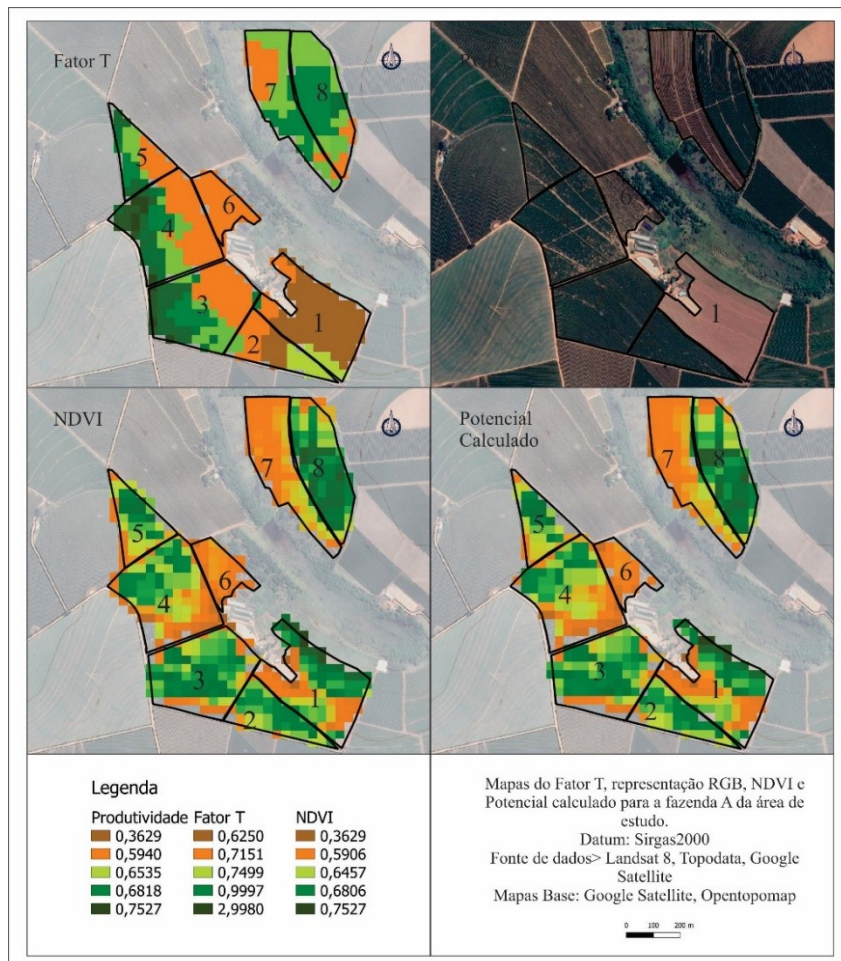


Figura 4. Visualização do Fator T (A), RGB (B), NDVI (C) e Potencial Calculado (D) para a Fazenda A no ano de 2020.

Para a fazenda B observamos um bom ajuste no modelo na estimativa do potencial dos talhões, sendo que para o fator T houve a falha na hierarquia entre os talhões 2 e 3, que se encontraram invertidos na ordem de classificação. No caso, o acréscimo do NDVI ao modelo ajustou de forma a corrigir a hierarquia, sendo o cálculo final de potencial mais adequado ao observado em campo. Em ordem, a hierarquia produtiva dos talhões conforme os dados de campo seria: Talhões 4, 3, 2, 1 e 5 respectivamente. A hierarquia observada conforme o fator T foi: 4, 2, 3, 1 e 5, e para o potencial calculado final a hierarquia foi ajustada se tornando idêntica à de dados de campo. A Figura 5 mostra a representação gráfica dos valores dos parâmetros fator T, NDVI e potencial calculado conforme a hierarquia produtiva no eixo X, enquanto a Figura 6 mostra a representação espacial da distribuição de classes destes parâmetros, para a Fazenda B.

Importante observar que para esta fazenda existe boa uniformidade de manejo, com lavouras de idades semelhantes, bialidade comum e tratamentos culturais semelhantes entre diferentes talhões. Outro ponto interessante a se observar é a possibilidade de que, em casos como o da fazenda B, o modelo aponte para a limitação do potencial de determinadas áreas, onde provavelmente há o desperdício de insumos, principalmente fertilizantes, os quais poderiam gerar respostas em termos de produtividade se realocados para áreas de maior potencial.

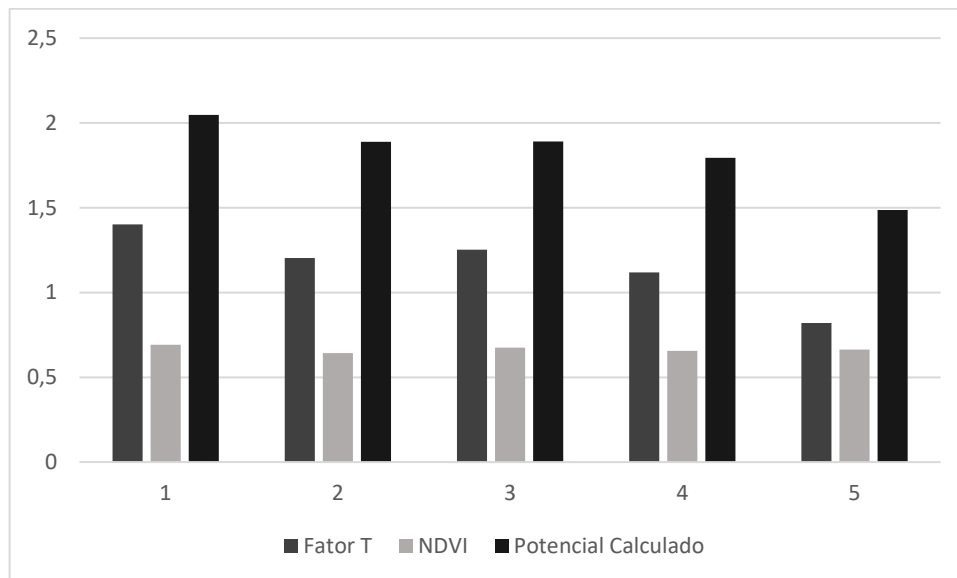


Figura 5. Fator T, Potencial Calculado e NDVI para a Fazenda B conforme hierarquia de produtividade no ano de 2020.



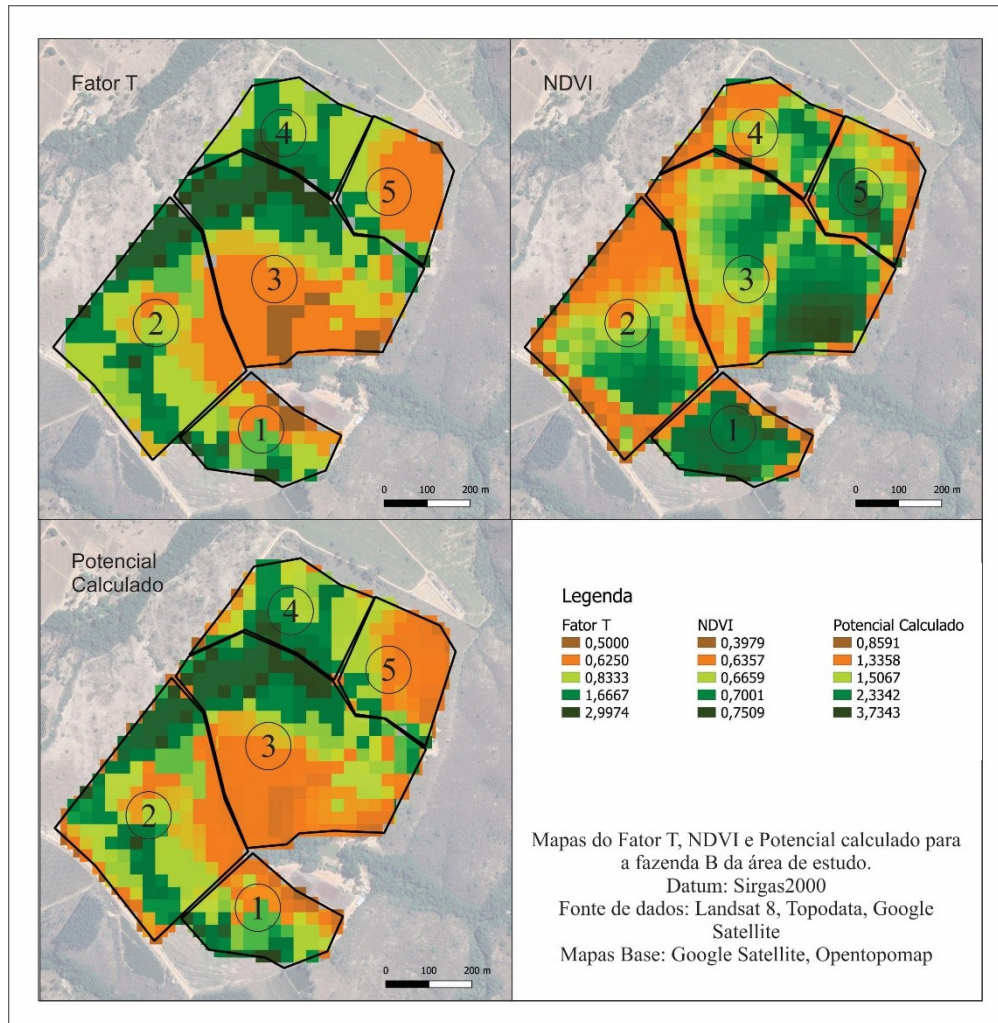


Figura 6. Visualização do Fator T , NDVI e Potencial Calculado para a Fazenda B no ano de 2020.

Para a fazenda C o nível de correlação entre as variáveis de fator T e Potencial calculado foi menor do que o observado nas fazendas A e B. Este comportamento se deve, provavelmente, à maior heterogeneidade de manejo e de idade entre os talhões. Quando observamos o gráfico da Figura 7, podemos observar que principalmente para os talhões 2 (70,23) e 4 (28,94) existe uma quebra no comportamento da relação. É importante observar que neste caso, o talhão 2 é um talhão jovem, de segunda safra, e portanto, no auge de seu potencial produtivo e vigor, e o talhão 4 é o mais velho, com os dados observados de produtividade constando na média de duas safras pós recepa (poda drástica), o que justifica sua baixa produtividade em vista de seu provável potencial. Os demais talhões, utilizados posteriormente na análise de regressão possuem maior homogeneidade entre si em termos de idade e espaçamento utilizados.

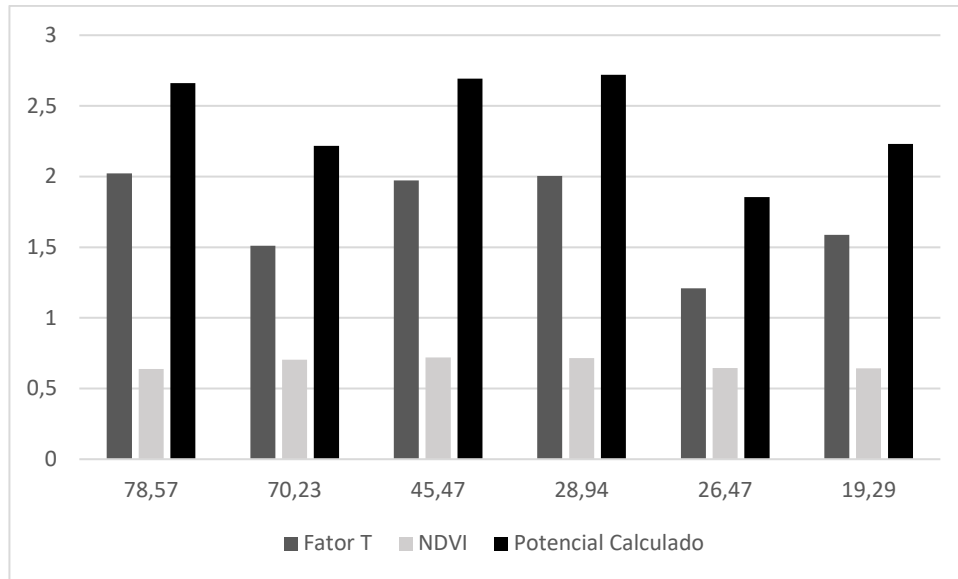


Figura 7. Fator T, Potencial Calculado e NDVI para a Fazenda C conforme hierarquia de produtividade no ano de 2020.

Com base nestas observações, os talhões 2 e 4 foram deixados fora da análise quantitativa da correlação. Observamos um ajuste polinomial de grau 2 com  $R^2$  de 0,8629 para a relação entre fator T e produtividade, porém com valor de correlação com NDVI bastante baixo, o que proporcionou uma diminuição no valor de  $R^2$  quando ajustado para o potencial calculado para 0,668. Os valores de RMSE foram de 29,7 e 31,5 sacas por hectare para fator T e potencial calculado, respectivamente. O gráfico da Figura 8 mostra a relação de regressão entre as variáveis produtividade média observada (sacas / hectare) e fator T.

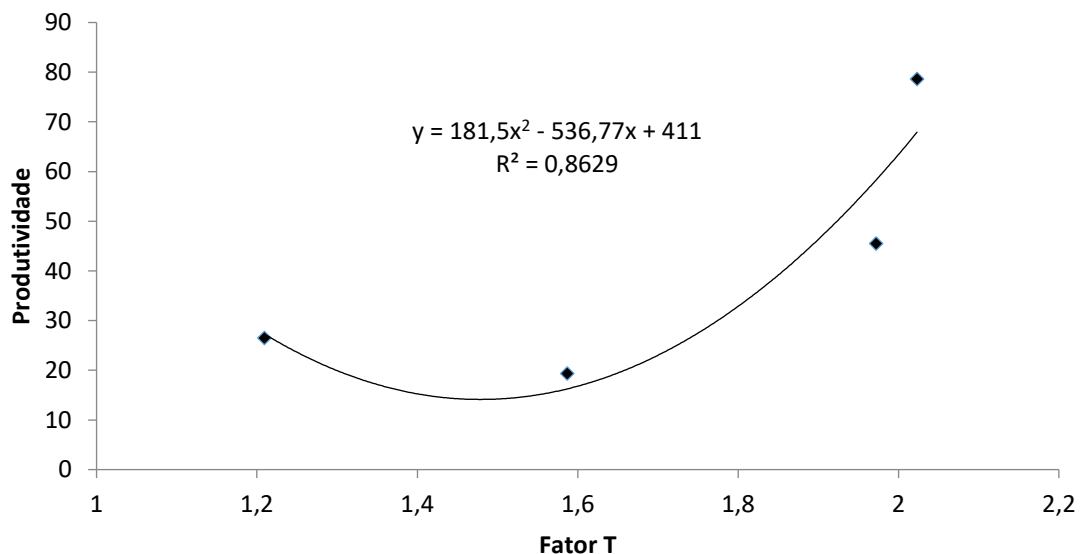


Figura 8. Gráfico da Análise de Regressão entre Fator T e Produtividade para a fazenda C.

Ressaltamos que o modelo tem potencial de ajuste final grande para casos como de nosso trabalho anterior, onde existe semelhança de manejo, idade e espaçamento, o que não é o caso na fazenda C. Existe uma grande diversidade de idades, técnicas de manejo e espaçamentos, o que proporciona baixa correlação, principalmente quanto ao NDVI, fazendo com que o resultado obtido pelo modelo seja pobre. De toda forma, é possível observar novamente que a classificação do terreno conforme os parâmetros topográficos e climáticos permitem a formação de zonas de manejo conforme o potencial das áreas.

Considerando os níveis de manejo e os comportamentos observados da relação entre a leitura dos parâmetros adaptados da fragilidade ambiental e a produtividade real, seja esta classificatória ou quantitativa, podemos observar um comportamento semelhante àquele apontado em nosso trabalho anterior, onde existe uma maior correlação dos níveis produtivos com fatores relacionados à topografia do que às leituras de índices vegetativos, no caso NDVI, para a cultura do cafeeiro. Estes resultados corroboram com a literatura que aponta a dificuldade de leitura da produtividade cafeeira a partir do NDVI por questões de idade, fenologia, bienalidade, podas e cultivares distintos (CARVALHO, 2019; HUNT et al., 2020; VIEIRA JÚNIOR et al., 2019). Por outro lado, ressaltamos que a topografia e as variáveis diretamente por ela influenciadas, como a temperatura da superfície e o poder de fluxo da água, influenciam de forma determinante no potencial produtivo de uma determinada área, por estes serem fatores determinantes da formação de solos (ROSSI; QUEIROZ NETO, 2001; SANCHEZ, 2009; SANCHEZ et al., 2005; TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005). Desta forma, embora seja complicada a tarefa de formar modelos que permitam estimar a produtividade cafeeira, por outro lado, ressaltamos a possibilidade de uso dos parâmetros aqui citados para a formação de zonas de manejo e uso racional do solo conforme seu potencial.

## **5.4 Conclusões**

Nosso trabalho mostra a possibilidade de identificar e classificar parâmetros ambientais de forma hierárquica quanto à sua influência na produtividade cafeeira de forma a qualificar diferentes locais conforme seu potencial, o que ressalta a possibilidade da utilização do método por nós proposto para a formação de zonas de manejo para a cafeicultura, o que pode ser uma ferramenta no auxílio à uma produção mais sustentável.

Quanto à quantificação do potencial, com os dados aqui levantados, não podemos afirmar esta possibilidade de forma ampla, embora no Capítulo 2 tenhamos demonstrado com sucesso sua utilização para o caso de estudo. A quantificação ou estimativa da produção cafeeira

é um tema delicado levando em conta as nuances da cultura quanto à sua fenologia e o direcionamento dos drenos fisiológicos, o que dificulta a tarefa aqui colocada. De forma direta, não encontramos aqui, ou no Capítulo 2, relação direta entre os níveis produtivos e o NDVI.

Mais uma vez, ressaltamos que nosso trabalho possibilitou o entendimento de que existem, em diferentes níveis, variações espaciais da produtividade ocasionadas por variações de solo, que por sua vez, podem ser estimadas pela leitura de feições da paisagem, conforme proposto por Ross (1994), sendo esta uma ferramenta útil, principalmente na Agricultura de Precisão.

Seria importante a partir deste momento, a comparação dos resultados dos modelos pixel a pixel com a finalidade de sua validação final. De toda forma, ressaltamos a possibilidade da utilização da leitura da paisagem com objetivo de criação de zonas de manejo específico para a cultura do café.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do primeiro trabalho nesta dissertação de mestrado buscamos diagnosticar os níveis de fragilidade ambiental e correlacionar com a dinâmica de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego Feio, principal área de estudo na dissertação. O método proposto por Ross (1994) foi adaptado de forma a atender a realidade da bacia do Córrego Feio e foi possível a partir deste gerar o diagnóstico da bacia. Observamos a tendência de ocupação de áreas menos frágeis por agricultura, principalmente pela cafeicultura, devido às características adequadas da região. No entanto, ao longo dos anos pode-se observar uma significativa substituição de áreas de café para lavouras anuais, como soja e milho, o que pode se dever, dentre outros, a mudanças ambientais e climáticas. Quanto às áreas de maior fragilidade, na maioria das vezes observou-se de forma desejável, a conservação e restauração de áreas, porém, nas ocorrências de ocupação antrópica observa-se a presença de atividades de maior impacto ambiental, principalmente ligadas à bovinocultura, o que leva a um cenário preocupante, principalmente ao longo do leito do Córrego Feio.

Os resultados aqui observados corroboram com a ideia inicial de que os níveis de fragilidade ambiental de áreas estariam ligados de forma direta aos níveis produtivos da cafeicultura, pois existe a ocupação preferencial desta atividade em áreas de baixa fragilidade. Ressaltamos a importância que existe de um melhor manejo das áreas de maior fragilidade na bacia, uma vez que estas são de essencial importância na manutenção do ciclo e da qualidade da água em uma bacia de tal importância regional.

No segundo trabalho desta dissertação de mestrado buscamos mostrar que é possível a partir de uma adaptação do método proposto por Ross (1994) para análise da fragilidade ambiental, criar um modelo que permite estimar a produtividade do cafeeiro, ou ainda, qualificar áreas de acordo com o seu potencial para a cafeicultura. Conseguimos com sucesso, no caso da área de estudo em Bambuí-MG criar um modelo que consegue estimar de forma satisfatória a safra cafeeira por talhão e qualificar as áreas de acordo com a combinação de parâmetros estáticos (topografia) e fatores dinâmicos (clima e vegetação).

O resultado de nosso segundo trabalho corrobora novamente com a ideia de que a fragilidade ambiental se correlaciona com a produtividade, uma vez que os parâmetros considerados como ideais neste trabalho se assemelham àqueles de nosso primeiro trabalho, salvo a declividade, que em níveis muito baixos não é considerada a melhor opção à cafeicultura. Também é interessante ressaltar a importância da qualificação de áreas quanto ao potencial na busca de uma cafeicultura mais sustentável, por esta prática possibilitar o

direcionamento adequado de insumos, evitando assim o desperdício e a contaminação do ambiente pelos mesmos.

No terceiro trabalho nós analisamos a aplicação do método proposto de adaptação do trabalho 2 em diferentes fazendas presentes na área de estudo do trabalho 1, e pudemos observar que embora não tenhamos conseguido um nível de similaridade tão grande quanto no trabalho 2, provavelmente devido ao menor controle de fatores ligados à produção, existe uma tendência de associação direta entre os níveis de fragilidade e a produtividade de áreas.

Podemos, a partir da análise conjunta dos três trabalhos nesta dissertação colocados, afirmar que existe um nível de associação entre os elementos da paisagem e a dinâmica da vegetação (fragilidade ambiental) com os níveis produtivos do cafeeiro, e portanto, a partir do mapeamento dos níveis fragilidade, conforme adaptação do proposto por Ross (1994) podemos criar um mapeamento que permita a utilização de insumos de forma mais adequada, como apoio à Agricultura de Precisão, e também, definir de forma mais eficiente áreas que devam ser mantidas ou restauradas para a conservação adequada de bacias hidrográficas. Desta forma, definimos que existe, de forma geral, um nível de correlação direto entre fragilidade ambiental e a produtividade cafeeira.

## REFERÊNCIAS

ABESSA, Denis; FAMÁ, Ana; BURUAEM, Lucas. The systematic dismantling of Brazilian environmental laws risks losses on all fronts. **Nature Ecology and Evolution**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 510–511, 2019. DOI: 10.1038/s41559-019-0855-9.

ANJINHO, Phelipe da Silva; BARBOSA, Mariana Abibi Guimarães Araujo; COSTA, Carlos Wilmer; MAUAD, Frederico Fábio. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 100, n. November 2018, p. 104946, 2021. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104946. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104946>.

ARAÚJO COSTA, Renata Cristina; PEREIRA, Gener Tadeu; TARLÉ PISSARRA, Teresa Cristina; SILVA SIQUEIRA, Diego; SANCHES FERNANDES, Luís Filipe; VASCONCELOS, Vinicius; FERNANDES, Luiz Alberto; PACHECO, Fernando António Leal. Land capability of multiple-landform watersheds with environmental land use conflicts. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 81, p. 689–704, 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.11.041.

ARSHAD, M. A. Tillage and soil quality: Tillage practices for sustainable agriculture and environmental quality in different agroecosystems. Editorial. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 53, n. 1, p. 1–2, 1999. DOI: 10.1016/S0167-1987(99)00071-9.

BARBOSA, Claudio C. F.; NOVO, Evlyn M. L. M.; MARTINS, Vitor S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. [s.l: s.n.]. Disponível em: [www.inpe.br](http://www.inpe.br).

BARRA, Geraldo Magela Jardim. The Coffee Quality Program in Brazil. *In: Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil: A Volume in the Consumer Science and Strategic Marketing Series*. [s.l.] : Elsevier, 2019. p. 65–90. DOI: 10.1016/B978-0-12-814721-4.00013-5.

BÉGUÉ, Agnès et al. Remote sensing and cropping practices: A review. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1–32, 2018. DOI: 10.3390/rs10010099.

BERNARDES, Tiago; MOREIRA, Maurício Alves; ADAMI, Marcos; RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor. Physic-environmental diagnosis of coffee crop in the state of Minas Gerais, Brazil. **Coffee Science**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 139–151, 2012. DOI: 10.25186/cs.v7i2.241.

BLACKBURN, Harvey; BLACKBURN, Harvey. Livestock & the environment : Finding a balance Table of contents. *[S. l.]*, n. July, p. 88, 1997. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/x5303e/x5303e02.htm>.

BODIN, Örjan; CRONA, Beatrice I. **The role of social networks in natural resource governance: What relational patterns make a difference?** *Global Environmental Change* Pergamon, , 2009. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2009.05.002.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. **Precision Agriculture**, *[S. l.]*, v. 5, n. 4, p. 359–387, 2004. DOI: 10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa.

BOSCHINI, Ana Paula Masson. **Produtividade e qualidade de grãos de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água no Distrito Federal**. [s.l.] : UNB, 2010. v. 2 Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/8060>.

BRAZ, Sérgio P.; URQUIAGA, Segundo; ALVES, Bruno J. R.; JANTALIA, Claudia P.; GUIMARÃES, Ana Paula.; DOS SANTOS, Camila A.; DOS SANTOS, Sashia C.; MACHADO PINHEIRO, Érika F.; BODDEY, Robert M. Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado . **Soil Science Society of America Journal**, *[S. l.]*, v. 77, n. 3, p. 914–928, 2013. DOI: 10.2136/sssaj2012.0269.

CAMARGO, Livia Arantes; MARQUES JÚNIOR, José; PEREIRA, Gener Tadeu; HORVAT, Renata Alves. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, *[S. l.]*, v. 32, n. 6, p. 2279–2288, 2008. DOI: 10.1590/s0100-06832008000600007.

CAPA, Daniel; PÉREZ-ESTEBAN, Javier; MASAGUER, Alberto. Unsustainability of recommended fertilization rates for coffee monoculture due to high N<sub>2</sub>O emissions. **Agronomy for Sustainable Development**, *[S. l.]*, v. 35, n. 4, p. 1551–1559, 2015. DOI: 10.1007/s13593-015-0316-z. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-015-0316-z>.

CARVALHO, Fábio M. V.; DE MARCO, Paulo; FERREIRA, Laerte G. The Cerrado into-pieces: Habitat fragmentation as a function of landscape use in the savannas of central Brazil. **Biological Conservation**, *[S. l.]*, v. 142, n. 7, p. 1392–1403, 2009. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.01.031.



CARVALHO, Humberto Fanelli. Genomic prediction in arabica coffee considering bienniality and threshold models. *[S. l.]*, 2019.

CASTRO, Selma Simões De; NETO, José Pereira de Queiroz. **Soil Erosion in Brazil from Coffee to the Present-day Soy Bean Production** *Developments in Earth Surface Processes* Elsevier, , 2009. DOI: 10.1016/S0928-2025(08)10011-6.

CASTRO FILHO, C.; HENKLAIN, J. C.; VIEIRA, M. J.; CASÃO, R. Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, *[S. l.]*, v. 20, n. 2–4, p. 271–283, 1991. DOI: 10.1016/0167-1987(91)90043-W.

CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino; CERRI, Carlos Clemente; MAIA, Stoécio Malta Ferreira; CHERUBIN, Maurício Roberto; FEIGL, Brigitte Josefine; LAL, Rattan. Reducing Amazon deforestation through agricultural intensification in the Cerrado for advancing food security and mitigating climate change. **Sustainability (Switzerland)**, *[S. l.]*, v. 10, n. 4, p. 1–18, 2018. DOI: 10.3390/su10040989.

COUGHENOUR, C. Milton. Innovating conservation agriculture: The case of no-till cropping. **Rural Sociology**, *[S. l.]*, v. 68, n. 2, p. 278–304, 2003. DOI: 10.1111/j.1549-0831.2003.tb00138.x.

COWIE, Annette L. et al. Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. **Environmental Science and Policy**, *[S. l.]*, v. 79, p. 25–35, 2018. DOI: 10.1016/j.envsci.2017.10.011.

COX, Thomas S.; GLOVER, Jerry D.; VAN TASSEL, David L.; COX, Cindy M.; DEHAAN, Lee R. Prospects for developing perennial grain crops. **BioScience**, *[S. l.]*, v. 56, n. 8, p. 649–659, 2006. DOI: 10.1641/0006-3568(2006)56[649:PFDPGC]2.0.CO;2.

CRAVE, Alain; GASCUEL-ODOUX, Chantal. **The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content** *Hydrological processes*, 1997.

CROSBY, Linda Goulet. Developing sustainable leadership strategies to increase corporate revenue. **Dissertation Abstracts International Section A: Humanities and Social Sciences**, *[S. l.]*, v. 77, n. 12- A(E), p. No Pagination Specified, 2017. Disponível em: <http://libaccess.mcmaster.ca/login?url=http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=psyc13&AN=2016-58397->

275%0Ahttp://sfx.scholarsportal.info/mcmaster?sid=OVID:psycdb&id=pmid:&id=doi:&issn=0419-4209&isbn=9781369008784&volume=77&iss.

CROSSON, Pierre; ANDERSON, Jock R. Demand and supply: trends in global agriculture. **Food Policy**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 105–119, 1994. DOI: 10.1016/0306-9192(94)90064-7.

CROUZEILLES, Renato; FELTRAN-BARBIERI, Rafael; FERREIRA, Mariana S.; STRASSBURG, Bernardo B. N. Hard times for the Brazilian environment. **Nature Ecology and Evolution**, [S. l.], v. 1, n. 9, p. 1213, 2017. DOI: 10.1038/s41559-017-0303-7. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41559-017-0303-7>.

DA SILVA, Warley Henrique; GUARNIERI, Patrícia; CARVALHO, José Márcio. Sustainable practices in the coffee supply chain in the Cerrado Mineiro Region, Brazil. **Journal of Operations and Supply Chain Management**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 90–100, 2018. DOI: 10.12660/joscmv11n2p90-100.

DAMASCENO, Vitória Gomes; TORRES, ; ; Antônia Flávia Fernandes; NETO, Clemente Fernandes dos Santos; RODRIGO, Silva Gregório Da; CÂNDIDO5, Magno José Duarte. ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO DE FORRAGEIRAS EXÓTICAS ÍNDICE DE VEGENORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI) FOR ESTIMATE THE PRODUCTIVE POTENTIAL OF EXOTIC FORAGES. **EDUCAÇÃO, CIÊNCIA, TECNOLOGIA E AMOR.**, [S. l.], p. 1–17, 2020.

DE CAMARGO, Marcelo Bento Paes. The impact of climatic variability and climate change on Arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, [S. l.], v. 69, n. 1, p. 239–247, 2010. DOI: 10.1590/s0006-87052010000100030.

DE FRAITURE, Charlotte; WICHELNS, Dennis. Satisfying future water demands for agriculture. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 97, n. 4, p. 502–511, 2010. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.08.008.

DE FREITAS, P. L.; LANDERS, J. N. The Transformation of Agriculture in Brazil Through Development and Adoption of Zero Tillage Conservation Agriculture. **International Soil and Water Conservation Research**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 35–46, 2014. DOI: 10.1016/S2095-6339(15)30012-5.

DE OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean

production. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 38, n. 1–2, p. 47–57, 1996. DOI: 10.1016/0167-1987(96)01021-5.

DE OLIVEIRA, O. C.; DE OLIVEIRA, I. P.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Chemical and biological indicators of decline/degradation of Brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 103, n. 2, p. 289–300, 2004. DOI: 10.1016/j.agee.2003.12.004.

DE SOUZA, Zigomar Menezes; MARQUES, José; PEREIRA, Gener Tadeu; BARBIERI, Diogo Mazza. Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 63, n. 2, p. 161–168, 2006. DOI: 10.1590/s0103-90162006000200008.

DERPSCH, R. Conservation Tillage , No-Tillage and. **Conservation Agriculture**, [S. l.], p. 181–190, 2003. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-1143-2\\_23](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-1143-2_23).

DERPSCH, R.; FRANZLUEBBERS, A. J.; DUIKER, S. W.; REICOSKY, D. C.; KOELLER, K.; FRIEDRICH, T.; STURNY, W. G.; SÁ, J. C. M.; WEISS, K. **Why do we need to standardize no-tillage research?Soil and Tillage Research**Elsevier, , 2014. DOI: 10.1016/j.still.2013.10.002.

EMBRAPA. Mapa de solos da região do Alto Paranaíba. Disponível em: [http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Alev\\_mg\\_alto\\_paranaiba\\_solos\\_wgs84\\_1](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Alev_mg_alto_paranaiba_solos_wgs84_1). Acesso em: 01/08/2020.

EVANS, L. T.; FISCHER, R. A. Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. **Symposium-1998 ASA Meeting**, [S. l.], v. 1551, p. 1544–1551, 1999.

FAHL, Joel Irineu; CARELLI, Maria Luiza Carvalho; ALFONSI, Eduardo Lauriano; CAMARGO, Marcelo Bento Paes De. Desenvolvimento E Aplicação De Metodologia Para Estimativa Da Produtividade Do Cafeeiro , Utilizando As Características Fenológicas Determinantes Do Crescimento E Produção Coffee Tree , Based on Phenological Characteristics That Determine the Growth. **Anais do Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, [S. l.], p. CD-ROM, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10820/1412>.

FANELLI CARVALHO, Humberto; GALLI, Giovanni; VENTORIM FERRÃO, Luís Felipe; VIEIRA ALMEIDA NONATO, Juliana; PADILHA, Lilian; PEREZ MALUF, Mirian;

RIBEIRO DE RESENDE, Márcio Fernando; GUERREIRO FILHO, Oliveira; FRITSCHENETO, Roberto. The effect of bienniality on genomic prediction of yield in arabica coffee. **Euphytica**, [S. l.], v. 216, n. 6, 2020. DOI: 10.1007/s10681-020-02641-7.

FEARNSIDE, Philip M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 23–38, 2001. DOI: 10.1017/S0376892901000030.

FERRARO, Mário Roberto. Ciência, Meio Ambiente e Cultura na Belle Époque Paulista: O “day after” da lavoura cafeeira. **Tese de Doutorado - Unicamp**, [S. l.], 2012.

FISCHER, R. A.; CONNOR, D. J. **Issues for cropping and agricultural science in the next 20 years** *Field Crops Research* Elsevier B.V., , 2018. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.03.008.

FONSECA, Gustavo Alberto Bouchardet Da; MACHADO, Ricardo Bomfim; PRADO, Alexandre Curvelo de Almeida. A Falta de Investimentos como Ameaça à Integridade do Cerrado. **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**, [S. l.], p. 1184–1197, 2002.

FRANÇA, Luciano Cavalcante de Jesus; MUCIDA, Danielle Piuzana; DE MORAIS, Marcelino Santos; CATUZZO, Humberto; ABEGÃO, João Luís Ramalho; PEREIRA, Israel Marinho. Zoneamento Da Fragilidade Ambiental De Ecossistemas Naturais E Antropizados Por Meio De Avaliação Multicritério. **Nativa**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 589, 2019. DOI: 10.31413/nativa.v7i5.7300.

FURLAN, Lucas Moreira; ROSOLEN, Vania; MOREIRA, César Augusto; BUENO, Guilherme Taitson; FERREIRA, Manuel Eduardo. The interactive pedological-hydrological processes and environmental sensitivity of a tropical isolated wetland in the Brazilian Cerrado. **SN Applied Sciences**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 1–15, 2021. DOI: 10.1007/s42452-021-04174-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04174-7>.

GARDEZI, Maaz; STOCK, Ryan. Growing algorithmic governmentality: Interrogating the social construction of trust in precision agriculture. **Journal of Rural Studies**, [S. l.], v. 84, p. 1–11, 2021. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2021.03.004.

GASQUES, J. G.; BASTOS, E. T.; VALDES, Constanza; BACCI, Miriam Rumenos Piedade. Produtividade da agricultura: resultados para o Brasil e estados selecionados. **Revista de**

**Política Agrícola**, [S. l.], v. XXIII, n. 3, p. 87–98, 2014. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/943>.

GAVRONSKI, Iuri; FERRER, Geraldo; PAIVA, Ely Laureano. ISO 14001 certification in Brazil: motivations and benefits. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 87–94, 2008. DOI: 10.1016/j.jclepro.2006.11.002.

GÉNIN, Alexandre; LEE, Steven R.; BERLOW, Eric L.; OSTOJA, Steven M.; KÉFI, Sonia. Mapping hotspots of potential ecosystem fragility using commonly available spatial data. **Biological Conservation**, [S. l.], v. 241, p. 108388, 2020. DOI: 10.1016/j.biocon.2019.108388.

GHINI, Raquel; HAMADA, Emília; PEDRO, Mário José; MARENGO, José Antonio; GONÇALVES, Renata Ribeiro Do Valle. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 43, n. 2, p. 187–194, 2008. DOI: 10.1590/S0100-204X2008000200005.

GIMENES, F. B. Q.; FILHO, O. A. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, [S. l.], n. 1994, p. 6564–6571, 2013.

GIRARDIN, Philippe; BOCKSTALLER, Christian; VAN DER WERF, Hayo. Assessment of potential impacts of agricultural practices on the environment: The AGRO\*ECO method. **Environmental Impact Assessment Review**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 227–239, 2000. DOI: 10.1016/S0195-9255(99)00036-0.

GRANT, R. J.; FERRARETTO, L. F. **Silage review: Silage feeding management: Silage characteristics and dairy cow feeding behavior** *Journal of Dairy Science* Elsevier Inc., , 2018. DOI: 10.3168/jds.2017-13729.

GRECCHI, Rosana Cristina; GWYN, Q. Hugh J.; BÉNIÉ, Goze Bertin; FORMAGGIO, Antônio Roberto; FAHL, Fernando César. Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado: A multidisciplinary approach to assess the impacts of agricultural expansion. **Applied Geography**, [S. l.], v. 55, p. 300–312, 2014. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.09.014.

HUNKE, Philip; MUELLER, Eva Nora; SCHRÖDER, Boris; ZEILHOFER, Peter. The Brazilian Cerrado: Assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. **Ecohydrology**, [S. l.], v. 8, n. 6, p. 1154–1180, 2015. DOI: 10.1002/eco.1573.

HUNT, David A.; TABOR, Karyn; HEWSON, Jennifer H.; WOOD, Margot A.; REYMONDIN, Louis; KOENIG, Kellee; SCHMITT-HARSH, Mikaela; FOLLETT, Forrest. Review of remote sensing methods to map coffee production systems. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 12, n. 12, p. 1–23, 2020. DOI: 10.3390/rs12122041.

JOSÉ, Jefferson Vieira; DE OLIVEIRA, Niclene Ponce Rodrigues; DA SILVA, Tonny Jose de Araújo; BONFIM-SILVA, Edna Maria; COSTA, Jéfferson de Oliveira; SOUSA, Helon Hébano de Freitas. Spatial-temporal dynamics of biome Cerrado using different vegetation indexes. **Australian Journal of Crop Science**, [S. l.], v. 13, n. 9, p. 1438–1446, 2019. DOI: 10.21475/ajcs.19.13.09.p1531.

KISS, Agnes. Is community-based ecotourism a good use of biodiversity conservation funds? **Trends in Ecology and Evolution**, [S. l.], v. 19, n. 5, p. 232–237, 2004. DOI: 10.1016/j.tree.2004.03.010.

KLINK, Carlos A.; MACHADO, Ricardo B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 707–713, 2005. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x.

KLINK, Carlos A.; SATO, Margarete N.; CORDEIRO, Giovanna G.; RAMOS, Maria Inês M. The role of vegetation on the dynamics of water and fire in the cerrado ecosystems: Implications for management and conservation. **Plants**, [S. l.], v. 9, n. 12, p. 1–27, 2020. DOI: 10.3390/plants9121803.

KOK, Marcel T. J. et al. Pathways for agriculture and forestry to contribute to terrestrial biodiversity conservation: A global scenario-study. **Biological Conservation**, [S. l.], v. 221, p. 137–150, 2018. DOI: 10.1016/j.biocon.2018.03.003.

KRINTZ, Chandra; WOLSKI, Rich; GOLUBOVIC, Nevena; LAMPEL, Benji; KLKARNI, Varun; SETHURAMASAMYRAJA, Balaji; ROBERTS, Bruce; LIU, Bo. SmartFarm: Improving Agriculture Sustainability Using Modern Information Technology. **UCSB Tech Report 2016-04 May 2016**, [S. l.], 2016. DOI: 10.1145/1235.

LÄDERACH, Peter; RAMIREZ-VILLEGAS, Julian; NAVARRO-RACINES, Carlos; ZELAYA, Carlos; MARTINEZ-VALLE, Armando; JARVIS, Andy. Climate change adaptation of coffee production in space and time. **Climatic Change**, [S. l.], v. 141, n. 1, p. 47–62, 2017. DOI: 10.1007/s10584-016-1788-9.

LATRUBESSE, Edgardo M.; ARIMA, Eugenio; FERREIRA, Manuel E.; NOGUEIRA, Sergio H.; WITTMANN, Florian; DIAS, Murilo S.; DAGOSTA, Fernando C. P.; BAYER, Maximiliano. Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. **Conservation Science and Practice**, [S. l.], v. 1, n. 9, p. 1–8, 2019. DOI: 10.1111/csp2.77.

LENSE, Guilherme Henrique Expedito; PARREIRAS, Taya Cristo; MOREIRA, Rodrigo Santos; AVANZI, Junior Cesar; MINCATO, Ronaldo Luiz. Estimates of soil losses by the erosion potential method in tropical latosols. **Ciencia e Agrotecnologia**, [S. l.], v. 43, 2019. DOI: 10.1590/1413-7054201943012719.

LI, Shanshan; PENG, Shaoliang; CHEN, Weifeng; LU, Xiaopei. INCOME: Practical land monitoring in precision agriculture with sensor networks. **Computer Communications**, [S. l.], v. 36, n. 4, p. 459–467, 2013. DOI: 10.1016/j.comcom.2012.10.011.

LOHMANN, Larry. Toward a different debate in environmental accounting: The cases of carbon and cost-benefit. **Accounting, Organizations and Society**, [S. l.], v. 34, n. 3–4, p. 499–534, 2009. DOI: 10.1016/j.aos.2008.03.002.

LOPES DOS SANTOS, Gilsonley; PEREIRA, Marcos Gervasio; DELGADO, Rafael Coll; MAGISTRALI, Iris Cristiane; GOMES DA SILVA, Claudio; MAGNO MOREIRA DE OLIVEIRA, Carlos; PEDRO BESSA LARANGEIRA, João; PAULA DA SILVA, Tiago. Degradation of the Brazilian Cerrado: Interactions with human disturbance and environmental variables. **Forest Ecology and Management**, [S. l.], v. 482, p. 118875, 2021. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118875.

MACEDO, Diego R.; HUGHES, Robert M.; KAUFMANN, Philip R.; CALLISTO, Marcos. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 635, p. 1267–1279, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.216.

MAGUIRE-RAJPAUL, Victoria A.; RAJPAUL, Vinesh M.; MCDERMOTT, Constance L.; GUEDES PINTO, Luís Fernando. Coffee certification in Brazil: compliance with social standards and its implications for social equity. **Environment, Development and Sustainability**, [S. l.], v. 22, n. 3, p. 2015–2044, 2020. DOI: 10.1007/s10668-018-0275-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0275-z>.

MANFRÉ, Luiz Augusto; DA SILVA, Alexandre Marco; URBAN, Rodrigo Custódio; RODGERS, John. Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: A study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region). **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 69, n. 3, p. 947–957, 2013. DOI: 10.1007/s12665-012-1979-2.

MARTINS, Thalita Isabella. Mapeamento geomorfológico da folha Piumhi, Minas Gerais. **Universidade Federal de Uberlândia**, [S. l.], v. Instituto, n. Dissertação de mestrado, 2013.

MASSA, Eric Macedo; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Aplicação De Um Modelo De Fragilidade Ambiental Relevô-Solo Na Serra Da Cantareira, Bacia Do Córrego Do Bispo, São Paulo-Sp. **Geography Department, University of Sao Paulo**, [S. l.], v. 24, n. 2012, p. 57–79, 2012. DOI: 10.7154/rdg.2012.0024.0004.

MCLAUGHLIN, Alison; MINEAU, Pierre. The impact of agricultural practices on biodiversity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 55, n. 3, p. 201–212, 1995. DOI: 10.1016/0167-8809(95)00609-V.

MESQUITA, Carlos Magno; REZENDE, João Eudes de; CARVALHO, Julian Silva; JÚNIOR, Marcos Antônio Fabri; MORAES, Niwton Castro; CARVALHO, Romulo Mathozinho de;; ARAÚJO, Willem Guilherme De. Manual do Café Manejo de Cafezais em Produção. **Emater-Mg**, [S. l.], p. 72, 2016.

METZGER, Jean Paul et al. Why Brazil needs its Legal Reserves. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 91–103, 2019. DOI: 10.1016/j.pecon.2019.07.002.

MINTESNOT, Adugnaw; DECHASSA, Nigussie; MOHAMMED, Ali. East African Journal of Sciences ( 2015 ) Association of Arabica Coffee Quality Attributes with Selected Soil Chemical Properties. [S. l.], v. 9, p. 73–84, 2015.

MOLIN, José Paulo. Geração E Interpretação De Mapas De Produtividade Para Agricultura De Precisão. [S. l.], v. 58, n. 12, p. 7250–7, 2014. Disponível em: [http://www.ler.esalq.usp.br/download/CLP\\_2000.01.PDF](http://www.ler.esalq.usp.br/download/CLP_2000.01.PDF).

MULLAN, B.; HAQQ-MISRA, J. Population growth, energy use, and the implications for the search for extraterrestrial intelligence. **Futures**, [S. l.], v. 106, p. 4–17, 2019. DOI: 10.1016/j.futures.2018.06.009.



NASIR, Muhammad Ali; CANH, Nguyen Phuc; LAN LE, Thi Ngoc. Environmental degradation & role of financialisation, economic development, industrialisation and trade liberalisation. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 277, p. 111471, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111471.

NEPSTAD, Lucy S.; GERBER, James S.; HILL, Jason D.; DIAS, Livia C. P.; COSTA, Marcos H.; WEST, Paul C. Pathways for recent Cerrado soybean expansion: Extending the soy moratorium and implementing integrated crop livestock systems with soybeans. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 14, n. 4, 2019. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb85.

NOGUEIRA, Sulimar M. C.; MOREIRA, Maurício A.; VOLPATO, Margarete M. L. Relationship between coffee crop productivity and vegetation indexes derived from OLI / Landsat-8 Sensor data with and without topographic correction. **International of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, [S. l.], v. 38, n. 3, p. 387–394, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n3p387-394/2018 RELATIONSHIP>.

OLIVEIRA-ANDREOLI, Erica Zanardo et al. Multi-temporal analysis of land use land cover interference in environmental fragility in a Mesozoic basin, southeastern Brazil. **Groundwater for Sustainable Development**, [S. l.], v. 12, n. June 2018, 2021. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100536.

OVALLE-RIVERA, Oriana; LÄDERACH, Peter; BUNN, Christian; OBERSTEINER, Michael; SCHROTH, Götz. Projected shifts in Coffea arabica suitability among major global producing regions due to climate change. **PLoS ONE**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 1–13, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0124155.

PACHECO, Ar; DE QUEIROZ CHAVES, Roselene; MAIA, Clarisse; NICOLI, Lana. Integration of crops, livestock, and forestry: A system of production for the Brazilian Cerrados. **Eco-efficiency: from vision to reality**, [S. l.], p. 51–60, 2012. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/959993/1/52.pdf>.

PERFECTO, Ivette; VANDERMEER, John; MAS, Alex; PINTO, Lorena Soto. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 54, n. 4, p. 435–446, 2005. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.10.009.

PERIÇATO, André Jesus; SOUZA, Marta Luzia De. O Estudo da Fragilidade Potencial e Emergente na Bacia Hidrográfica do Rio das Antas, Noroeste do Paraná. **Caderno de**

**Geografia**, [S. l.], v. 29, n. 59, p. 1064–1082, 2019. DOI: 10.5752/p.2318-2962.2019v29n59p1064.

PETEK, Marcos Rafael; SERA, Tumoru; FONSECA, Inês Cristina de Batista. Exigências climáticas para o desenvolvimento e maturação dos frutos de cultivares de *Coffea arabica*. **Bragantia**, [S. l.], v. 68, n. 1, p. 169–181, 2009. DOI: 10.1590/s0006-87052009000100018.

PINTO, Luís Fernando Guedes; MCDERMOTT, Constance. Equity and forest certification - A case study in Brazil. **Forest Policy and Economics**, [S. l.], v. 30, p. 23–29, 2013. DOI: 10.1016/j.forpol.2013.03.002.

PRETTY, Jules. Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [S. l.], v. 363, n. 1491, p. 447–465, 2008. DOI: 10.1098/rstb.2007.2163.

RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Annals of Botany**, [S. l.], v. 80, n. 3, p. 223–230, 1997. DOI: 10.1006/anbo.1997.0469.

REAY, Dave. **Climate-Smart Food**. [s.l: s.n.].

ROBALINO, Juan; PFAFF, Alexander. Ecopayments and deforestation in Costa Rica: A nationwide analysis of PSA's initial years. **Land Economics**, [S. l.], v. 89, n. 3, p. 432–448, 2013. DOI: 10.3368/le.89.3.432.

ROGERS, Mark. The Definition and Measurement of Productivity \*. [S. l.], n. 9, 1998.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados**, 1994.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Landforms and Environmental planning. [S. l.], p. 38–51, 2012.

ROSSI, Marcio; QUEIROZ NETO, José Pereira. Relação solo/paisagem em regiões tropicais úmidas: o exemplo da Serra do Mar em São Paulo, Brasil. **Geography Department, University of Sao Paulo**, [S. l.], v. 14, p. 11–23, 2001. DOI: 10.7154/rdg.2001.0014.0001.

SAINJU, U. M.; SINGH, B. P. Tillage, cover crop, and kill-planting date effects on corn yield

and soil nitrogen. **Agronomy Journal**, [S. l.], v. 93, n. 4, p. 878–886, 2001. DOI: 10.2134/agronj2001.934878x.

SAITO, Moeko. Sustainable Coffee Production. **Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers**, [S. l.], n. May, p. 384–390, 2008. DOI: 10.1002/9783527619627.ch13.

SANCHES, Guilherme M.; MAGALHÃES, Paulo S. G.; KOLLN, Oriel T.; OTTO, Rafael; RODRIGUES, Francelino; CARDOSO, Terezinha F.; CHAGAS, Mateus F.; FRANCO, Henrique C. J. Agronomic, economic, and environmental assessment of site-specific fertilizer management of Brazilian sugarcane fields. **Geoderma Regional**, [S. l.], v. 24, p. e00360, 2021. DOI: 10.1016/J.GEODRS.2021.E00360.

SANCHEZ, Maria Gabriela Baracat. Relação Solo-relevo em áreas sob cultivo de café no sudoeste de Minas Gerais. [S. l.], p. 101, 2009.

SANCHEZ, Rodrigo B.; MARQUES JÚNIOR, José; PEREIRA, Gener T.; SOUZA, Zigomar M. De. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 489–495, 2005. DOI: 10.1590/s1415-43662005000400008.

SANO, Edson Eyi et al. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2002 to 2013. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [S. l.], v. 54, 2019. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00138.

SANTOS, Gilmar O.; ROSALEN, David L.; DE FARIA, Rogério T. Use of active optical sensor in the characteristics analysis of the fertigated brachiaria with treated sewage. **Engenharia Agrícola**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 1213–1221, 2017. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n6p1213-1221/2017.

SANTOS, Rafael S.; WIESMEIER, Martin; CHERUBIN, Maurício R.; OLIVEIRA, Dener M. S.; LOCATELLI, Jorge L.; HOLZSCHUH, Marquel; CERRI, Carlos E. P. Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. **Geoderma**, [S. l.], v. 400, p. 115149, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115149.

SCHAEFER, Carlos Ernesto G. R. Bases físicas da paisagem brasileira: Estrutura geológica, relevo e solos. [S. l.], p. 221–278, 2013.

SCHIAVO, Bruna Nascimento de Vascomcellos; HENTZ, Angela Maria Klein; DALLA CORTE, Ana Paula; SANQUETTA, Carlos Roberto. Caracterização da fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica urbana no município de Santa Maria - RS Characterization of the environmental fragility of a urban river basin in the municipality of Santa Maria – RS. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 464–474, 2016.

SCHNABEL, Susanne; DAHLGREN, Randy A.; MORENO-MARCOS, Gerardo. **Soil and Water Dynamics**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1007/978-94-007-6707-2\_4.

SCHNEITZ, Kay et al. **Plant biology**. [s.l: s.n.]. v. 5 DOI: 10.1016/s1369-5266(02)00276-5.

SEDIYAMA, Gilberto Chohaku; CÉSAR, Júlio; MELO, Ferreira De; ROSA, Alexandre; RIBEIRO, Aristides; COSTA, Marcos Heil; HAMAKAWA, Paulo José. Zoneamento agroclimático do cafeeiro ( *Coffea arabica* L .) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 501–509, 2001.

SEELAN, Santhosh K.; LAGUETTE, Soizik; CASADY, Grant M.; SEIELSTAD, George A. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 88, n. 1–2, p. 157–169, 2003. DOI: 10.1016/j.rse.2003.04.007.

SENTELHAS, Paulo César; BATTISTI, Rafael; SAKO, Henry; RODRIGUES, Lennis Afraire. Clima e produtividade da soja: variabilidade climática como fator controlador da produtividade. **Boletim de Pesquisa**, [S. l.], 2018.

SILVA, Fábio Moreira Da; SOUZA, Zigomar Menezes De; FIGUEIREDO, Carlos Augusto Pereira De; MARQUES JÚNIOR, José; MACHADO, Rodrigo Villela. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 401–407, 2007. DOI: 10.1590/s0103-84782007000200016.

SILVA, J. F.; FARIÑAS, M. R.; FELFILI, J. M.; KLINK, C. A. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 536–548, 2006. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2005.01422.x.

SILVA, Samuel; QUEIROZ, Daniel; SANTO, Nerilson; PINTO, Francisco. Influence of Climate, Soil, Topography and Variety on the Terroir and on Coffee Quality. **Journal of**

**Experimental Agriculture International**, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 1–15, 2018. DOI: 10.9734/jeai/2018/41499.

SOUTH, Stephen; QI, Jiaguo; LUSCH, David P. Optimal classification methods for mapping agricultural tillage practices. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 91, n. 1, p. 90–97, 2004. DOI: 10.1016/j.rse.2004.03.001.

SOUZA, Carlos M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 12, n. 17, 2020. DOI: 10.3390/RS12172735.

SOUZA, Zigomar Menezes De; MARQUES JÚNIOR, José; PEREIRA, Gener Tadeu; MOREIRA, Luis Fernando. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 34, n. 6, p. 1763–1771, 2004. DOI: 10.1590/s0103-84782004000600015.

SPAROVEK, Gerd; BARRETTO, Alberto Giaroli De Oliveira Pereira; MATSUMOTO, Marcelo; BERNDES, Göran. Effects of Governance on Availability of Land for Agriculture and Conservation in Brazil. **Environmental Science and Technology**, [S. l.], v. 49, n. 17, p. 10285–10293, 2015. DOI: 10.1021/acs.est.5b01300.

SPAROVEK, Gerd; BERNDES, Goran; KLUG, Israel L. F.; BARRETTO, Alberto G. O. P. Brazilian agriculture and environmental legislation: Status and future challenges. **Environmental Science and Technology**, [S. l.], v. 44, n. 16, p. 6046–6053, 2010. DOI: 10.1021/es1007824.

STRAUCH, Michael; CORD, Anna F.; PÄTZOLD, Carola; LAUTENBACH, Sven; KAIM, Andrea; SCHWEITZER, Christian; SEPPELT, Ralf; VOLK, Martin. Constraints in multi-objective optimization of land use allocation – Repair or penalize? **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], v. 118, p. 241–251, 2019. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.05.003.

TAGHIZADEH-MEHRJARDI, Ruhollah; NABIOLLAHI, Kamal; RASOLI, Leila; KERRY, Ruth; SCHOLTEN, Thomas. Land suitability assessment and agricultural production sustainability using machine learning models. **Agronomy**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 1–20, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10040573.

TALBOT, John M. The Coffee commodity chain in the world-economy: Arrighi's systemic

cycles and braudel's layers of analysis. **Journal of World-Systems Research**, [S. l.], v. XVII, n. 1, p. 58–88, 2011.

TORRADO, Pablo Vidal; LEPSCH, Igor Fernandes; CASTRO, Selma Simões De. Conceitos e Aplicações das Relações Pedologia-Morfologia em Regiões Tropicais Úmidas. [S. l.], 2005.

TRIPATHI, Abhishek D.; MISHRA, Richa; MAURYA, Kamlesh K.; SINGH, Ram B.; WILSON, Douglas W. Estimates for world population and global food availability for global health. *In: The Role of Functional Food Security in Global Health*. [s.l.] : Elsevier, 2018. p. 3–24. DOI: 10.1016/B978-0-12-813148-0.00001-3.

VALE, Mariana M.; BERENGUER, Erika; ARGOLLO DE MENEZES, Marcio; VIVEIROS DE CASTRO, Ernesto B.; PUGLIESE DE SIQUEIRA, Ludmila; PORTELA, Rita de Cássia Q. The COVID-19 pandemic as an opportunity to weaken environmental protection in Brazil. **Biological Conservation**, [S. l.], v. 255, p. 108994, 2021. DOI: 10.1016/j.biocon.2021.108994.

VALERIANO, Márcio De Morisson. Topodata : Guia Para Utilização De Dados. **Inpe**, [S. l.], v. 8, p. 73, 2008.

VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. Environmental land use conflicts: A threat to soil conservation. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 41, p. 172–185, 2014. DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.05.012.

VIEIRA JÚNIOR, Indalécio Cunha; DA SILVA, Carlos Pereira; NUVUNGA, Joel Jorge; BOTELHO, César Elias; GONÇALVES, Flávia Maria Avelar; BALESTRE, Márcio. Mixture mixed models: Biennial growth as a latent variable in coffee bean progenies. **Crop Science**, [S. l.], v. 59, n. 4, p. 1424–1441, 2019. DOI: 10.2135/cropsci2018.02.0141.

VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M. R.; LACERDA, M. P. C.; VEIGA, R. D.; EPIPHANIO, J. C. N. Crop parameters for the evaluation of the spectral response of coffee (*Coffea Arabica*) areas within the state of minas gerais, Brazil. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, [S. l.], v. 35, p. 111–118, 2004.

ZHANG, Naiqian; WANG, Maohua; WANG, Ning. Precision agriculture - A worldwide overview. *In: COMPUTERS AND ELECTRONICS IN AGRICULTURE 2002*, **Anais [...]**. : Elsevier, 2002. p. 113–132. DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00096-0.

ZISKA, Lewis H.; BRADLEY, Bethany A.; WALLACE, Rebekah D.; BARGERON, Charles T.; LAFOREST, Joseph H.; CHOUDHURY, Robin A.; GARRETT, Karen A.; VEGA, Fernando E. Climate change, carbon dioxide, and pest biology, managing the future: Coffee as a case study. **Agronomy**, [S. l.], v. 8, n. 8, p. 1–21, 2018. DOI: 10.3390/agronomy8080152.