

**WESLEY OLIVEIRA SOARES**

**MODELAGEM DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO LAMINAR (*Sheet Erosion*) NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO XOPOTÓ (MG) ATRAVÉS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO E MACHINE LEARNING**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Geografia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Lopes de Faria

**VIÇOSA-MINAS GERAIS**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S676m  
2023 Soares, Wesley Oliveira, 1996-  
Modelagem da suscetibilidade à erosão laminar (*Sheet Erosion*) na bacia hidrográfica do Rio Xopotó (MG) através de análise multicritério e machine learning / Wesley Oliveira Soares. – Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (86 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexo.

Orientador: André Luiz Lopes de Faria.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Geografia, 2023.

Referências bibliográficas: f. 74-85.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.356>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Erosão - Xopotó, Rio, Bacia (MG). 2. Bacias hidrográficas - Zona da Mata (MG : Mesorregião). 3. Análise espacial (Estatística). 4. Análise multiníveis (Estatística). 5. Aprendizado do computador. I. Faria, André Luiz Lopes de, 1970-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Geografia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

CDD 22. ed. 551.483098151


WESLEY OLIVEIRA SOARES

**MODELAGEM DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO LAMINAR (*Sheet Erosion*) NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO XOPOTÓ (MG) ATRAVÉS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO E MACHINE LEARNING**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Geografia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 30 de março de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 WESLEY OLIVEIRA SOARES  
Data: 28/07/2024 22:18:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Wesley Oliveira Soares  
Autor

Documento assinado digitalmente  
 ANDRE LUIZ LOPES DE FARIA  
Data: 29/07/2024 09:36:47-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

André Luiz Lopes de Faria  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

### **Deus**

Agradeço primeiramente a Deus. Sendo ainda mais específico, agradeço ao Deus que não é somente uma força imaginária ou um poder vindo do acaso ou da natureza. Agradeço ao Deus vivo, criador dos céus e da terra, que se manifesta de diversas formas ao ser humano, como o fez para Moisés por meio da sarça ardente, afirmando “Eu Sou o que Sou”(Êxodo 3:14), se afirmando ainda como “O Senhor, o Deus de vossos pais, o Deus de Abraão, de Isaque e de Jacó” (Êxodo 3:14). Esse Deus maravilhoso ainda se manifestou a tantos outros, conforme descrito na Bíblia Sagrada e, por infinita Graça, se manifestou a mim, miserável pecador. Agradeço ao Deus que enviou seu filho, o Senhor Jesus Cristo para salvar o ser humano do pecado, como está escrito “Deus amou o mundo de tal maneira que deu o seu Filho unigênito, para que todo aquele que nele crê não pereça, mas tenha a vida eterna” (João 3:16). Agradeço ao Deus que habita em meu ser, por meio do Espírito Santo, o qual, além de me mostrar que sou um pecador e que preciso da misericórdia de Deus (João 16:8), me capacita a lutar contra o pecado e estar mais próximo de Deus, me guiando em toda a verdade (João 16:13). Esse Deus maravilhoso é a base, a totalidade, real e maior motivo da minha existência. Que todo meu respirar seja para a Glória de Deus, “Porque Dele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente. Amém.” (Romanos 11:36).

### **Família**

Agradeço a minha esposa Gilmara, que Deus colocou na minha vida na hora que eu muito precisava e hoje é uma verdadeira companheira, me apoiando em meus projetos, sendo fundamental para meu crescimento como homem e me proporcionando grande alegria em estar ao seu lado todos os dias. Agradeço ao meu filho Davi que, enquanto eu produzia essa dissertação estava sendo gerado no ventre de sua mãe Gilmara. O Davi muito me ensina e me alegra a cada dia, sendo uma grande bênção, fazendo eu provar dessa amor tão grande, que é o amor paterno. Com a responsabilidade da paternidade sinto que cresci muito como homem e também como esposo. Agradeço a minha mãe Elaine que foi minha mãe e pai ao mesmo tempo, me criando com muito amor, carinho e dedicação, a qual sempre se esforçou e insistiu para que eu estudasse e fez o que de melhor uma mãe pode fazer ao seu filho, que é ensinar a Bíblia Sagrada e os valores cristãos. Mãe, aqui está mais um resultado de tudo o que você fez por mim. Agradeço a minha avó Zazá, que foi como uma segunda mãe, ajudando na minha criação, buscando sempre me ajudar em tudo, me dando bons conselhos, sendo uma ótima companhia e auxiliando sempre que precisei em várias áreas e etapas da minha vida. Agradeço aos meus tios; Edenilson, que não tem medido esforços para me ajudar, isso em várias partes da minha vida e, sobretudo nos últimos anos, com atitudes e ajudas que influenciaram diretamente para eu estar onde estou hoje, inclusive para a confecção dessa dissertação de mestrado. Agradeço ao meu tio Elsinho que é uma ótima companhia, sempre espontâneo, alegre, no qual já passamos ótimos momentos juntos ao longo da minha vida. Agradeço a Adriana, esposa do Elsinho, que sempre fez o papel de tia muito bem feito para comigo, me tratando muito bem, desde que eu era muito pequeno até hoje. Agradeço aos meus primos; Igor, por ser meu irmão e estar presente ao meu lado durante minha vida, sempre demonstrando muito companheirismo e grande amizade, sendo uma pessoa muitíssimo importante em minha vida, tanto nos bons momentos, quanto no momentos difíceis. Junto ao Igor, agradeço a sua hoje noiva, Crislene. Agradeço por estar junto ao meu primo, fazendo bem a ele e também por ter acolhido a nossa família como a sua, sendo que a recíproca também é verdadeira. Agradeço ao meu primo Ramon que, mesmo com todas as provações que já passou em sua vida se esforça para ser uma pessoa correta em suas atitudes, demonstrando para nós muita força, sendo um exemplo de superação para mim. Mesmo que pareça fútil para muitos agradeço ao meu companheirinho Dinho, que é um

cachorro, mas faz parte da minha vida desde minha adolescência, me dando muito carinho e amor.

Agradeço aos entes queridos que já se foram. Por mais que não possam ver, fica registrado meus agradecimentos a meu avô Silvestre Batista de Oliveira, que muito me ajudou em minha criação, sendo muito importante para mim. Lembro quando lhe dei uma camisa escrito “Pai, pise firme, pois seguirei seus passos”. Apesar de sua ausência, acredito que estou seguindo alguns de seus ensinamentos, como os valores do trabalho e da honestidade. Sou grato ao meu padrastrô José Lopes Clara, o que pude conviver pouco, mas foi suficiente para ter momentos de alegria, companheirismo e também de bons ensinamentos. Apesar de ter nos deixado em 2004, eu e minha mãe ainda colhemos o fruto de seu trabalho, o qual foi fundamental para que eu pudesse ter a oportunidade de estudar, fazer graduação e agora o mestrado. Meu padrastrô foi um instrumento de Deus para abençoar minha vida. Agradeço também em memória ao meu tio Evandro Luiz de Oliveira, o qual nos deixou precocemente mas, tenho certeza que se estivesse entre nós iria ficar feliz por minhas conquistas.

### **UFV, DGE, Professores e colegas**

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa, instituição essa de grande importância em muitas etapas da minha vida, desde a minha infância até agora na fase adulta. Na graduação e mestrado foram muitas vivências, sendo que todas ajudaram de alguma forma a moldar meu caráter e também meu lado profissional. Agradeço aos professores que de alguma forma influenciaram em minha vida, em aulas, estágios remunerados e voluntários, dentre outros. Em especial agradeço muito ao professor André Luiz Lopes de Faria, o qual participou da minha formação desde o ano de 2016, vendo minha evolução, conhecendo meus defeitos e também minhas qualidades. Estar no Laboratório de Geomorfologia do Quaternário foi algo grandioso para mim, que ampliou minha visão da Geografia, dando a oportunidade de eu trabalhar com Geoprocessamento, área essa fundamental para minha vida profissional. Com toda certeza tal vivência e conhecimento mudaram o rumo da minha vida. Agradeço a todos colegas que pude ter a oportunidade de conhecer e, sobretudo aos amigos que ganhei na UFRV. Acho difícil citar nomes, mas aqui destaco o Gabriel Marinho, Marcos Venâncio, Cristian Lennon, Pétrio, Vitor Vianna. Além desses, destaco como amigos, mas também, parceiros em trabalhos no Geoprocessamento, que muito me ajudaram, sendo eles Heitor Lacerda, Humberto Paiva, Geovanna Aparecida. Além desses agradeço aos colegas do Laboratório, que também muito me ajudaram, mas como são muitos nomes não irei citar todos. Agradeço a todos que fazem o Departamento de Geografia da UFRV funcionar. Essas pessoas são fundamentais para cada pesquisa que é gerada e para cada profissional que é formado.

### **CAPES**

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

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Confia ao Senhor as tuas obras, e teus pensamentos  
serão estabelecidos. Provérbios 16:3.

## RESUMO

SOARES, Wesley Oliveira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2023. **Modelagem da suscetibilidade à erosão laminar (*sheet erosion*) na bacia hidrográfica do rio xopotó (mg) através de análise multicritério e machine learning.** Orientador: André Luiz Lopes de Faria.

O estudo da erosão do solo constitui uma parte importante do plano de manejo de bacias hidrográficas. Com tais estudos é possível desenvolver diferentes ações que buscam contribuir para o uso e ocupação da terra a partir de uma lógica conservacionista. Nesse contexto, modelos de susceptibilidade à erosão podem gerar informações que apoiem os processos de tomada de decisão. Devido a importância desses modelos e a existência de diferentes métodos que podem ser aplicados para os gerar, objetiva-se no presente estudo aferir, a partir da análise multicritério e *Machine Learning*, qual o método que gera o modelo de susceptibilidade à erosão laminar na BHRX com maior acurácia. Para tanto, foram utilizados os métodos de Sobreposição Ponderada, Analytic Hierarchy Process (AHP) e *Random Forest* (RF) com algumas variações, onde o RF foi utilizado de três formas, sendo a primeira com as variáveis de entrada selecionadas de forma manual, a segunda a partir do método *Recursive Feature Elimination* (RFE) e a terceira com o uso das variáveis selecionadas pelo RFE e o modelo gerado pelo AHP como variável. As variáveis selecionadas manualmente pelos decisores foram: Uso da terra, Declividade, Orientação das vertentes, Altitude e Geomorfologia. As variáveis selecionadas pelo método RFE foram: Altitude, Orientação das vertentes, Declividade, *Slope Length*, Distância das estradas rurais, Pluviosidade, TWI, Uso da terra e Solos. Dentre os métodos avaliados através da curva ROC, foi visto que o método mais simples, que é a Sobreposição Ponderada obteve melhor resultado nesse contexto. Também, verifica-se que os locais com declividade mais acentuada, vertentes voltadas para o norte e nordeste e com uso de pastagem ou solo exposto são locais que, em todos os modelos apresentaram alta ou altíssima susceptibilidade à erosão.

Palavras-chave: Erosão do solo. Bacias hidrográficas. Modelos espaciais. Análise multicritério. Machine Learning.

## ABSTRACT

SOARES, Wesley Oliveira, M. Sc., Federal University of Viçosa, March 2023.  
**Modeling of susceptibility to laminar erosion (sheet erosion) in the Xopotó river basin (MG) through multicriteria analysis and machine learning.** Advisor: André Luiz Lopes de Faria.

The study of soil erosion is an important part of the watershed management plan. With such studies it is possible to develop different actions that seek to contribute to the use and occupation of the soil from a conservationist logic. In this context, erosion susceptibility models can generate information to support decision-making processes. Due to the importance of these models and the existence of different methods that can be applied to generate them, the objective of this study is to assess, based on multicriteria analysis and *Machine Learning*, which method generates the model of susceptibility to laminar erosion in the BHRX with greater accuracy. For this purpose, the *Weighted Overlay*, *Analytic Hierarchy Process* (AHP) and Random Forest (RF) methods were used with some variations, where the RF was used in three ways, the first with manually selected input variables, the second from the Recursive Feature Elimination (RFE) method and the third with the use of variables selected by RFE and the model generated by AHP as a variable. The variables selected manually by the decision makers were: Land use, Slope, Orientation of the slopes, Altitude and Geomorphological Forms. The variables selected by the RFE method were Altitude, Orientation of slopes, Slope, Slope Length, Distance from rural roads, Rainfall, TWI, Land use and Soils. Among the methods evaluated through the ROC curve, it was seen that the simplest method, which is Weighted Overlay, obtained the best result in this context. Also, it appears that the places with steeper slopes, slopes facing north and northeast and using pasture or exposed soil are places that, in all models, showed high or very high susceptibility to erosion.

Keywords: Soil erosion. Watersheds. Spatial models. Multicriteria analysis. Machine Learning.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Atuação da erosão laminar .....	21
Figura 2 - Atuação da erosão linear.....	22
Figura 3 - Componentes de um SIG.....	25
Figura 4 - Estrutura do método AHP.....	28
Figura 5 - Etapas da Sobreposição Ponderada.....	30
Figura 6 - Mapa de localização da BHRX.....	32
Figura 7 - Fluxograma metodológico.....	33
Figura 8 - Funcionamento da ferramenta aspect.....	41
Figura 9 - Espacialização das amostras de solo.....	45
Figura 10 - Espacialização das amostras.....	53
Figura 11 - Acurácia das variáveis segundo o método RFE.....	54
Figura 12 - Importância das variáveis no modelo de uso da terra.....	57
Figura 13 - Classes de uso da terra classificadas.....	58
Figura 14 - Uso e ocupação da BHRX.....	59
Figura 15 - Evolução temporal dos cortes.....	62
Figura 16 - Estradas rurais.....	64
Figura 17- Representação das estradas rurais.....	65
Figura 18 - Erosões próximas à estradas rurais.....	66
Figura 19 - Modelos utilizados para gerar a susceptibilidade à erosão.....	67
Figura 20 - Modelos de susceptibilidade à erosão na BHRX.....	71

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Tabela Fundamental de Saaty.....	29
<b>Tabela 2-</b> Aplicação das variáveis.....	35
<b>Tabela 3-</b> Performance das variáveis no RFE.....	55

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AUC	Area under the curve
BHRX	Bacia Hidrográfica do Rio Xopotó
BOA	Bottom Of Atmosphere
CHIRPS	Climate Hazards group Infrared Precipitation with Station
CODEMIG	Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerai
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DCLG	Department for Communities and Local Government
DE	Distância das Estradas
DR	Distância dos Rios
DGED	Defense Gridded Elevation Data
DTED	Digital Terrain Elevation Data
ESA	European Space Agency
ESDAC	European Soil Data Centre
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FAO	Agriculture Organization of the United Nations
FPR	False Positive Rate
GIS	Geographic Information System
IA	Inteligência artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
KML	Keyhole Markup Language
MDE	Modelo de Elevação
ML	Machine Learning
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
RF	Random Forest

RF/RFE	Random Forest com Variáveis Escolhidas pelo RFE
RF MANUAL	Random Forest com Variáveis Escolhidas Manualmente
RFE	Recursive feature elimination
ROC	Receiver Operating Characteristic
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
SIG/SIG's	Sistema de Informação Geográfica ou Sistemas de Informações Geográficas
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SP	Sobreposição Ponderada
SR	Sensoriamento Remoto
TOA	Radiação do Topo da atmosfera
TPR	True Positive Rate
TWI	Topographical Wetness Index
UCT	Uso e Cobertura da Terra
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 PROBLEMA</b> .....	15
<b>3 HIPÓTESE</b> .....	16
<b>4 JUSTIFICATIVA</b> .....	16
<b>5 OBJETIVOS</b> .....	17
5.1 Geral.....	17
5.2 Específico.....	17
<b>6 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
6.1 Erosão dos solos.....	19
6.2 Geoprocessamento, SIG, Sensoriamento remoto e modelagem.....	24
6.3 Análise multicritério.....	26
6.4 Analytic Hierarchy Process.....	27
6.5 Análise de sobreposição ponderada.....	30
6.6 Machine Learning: Random Forest.....	31
<b>7 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	31
<b>8 METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....	33
8.1 Banco de dados e variáveis.....	34
8.2 Uso da terra.....	37
8.3 Distância das estradas e dos rios.....	38
8.4 Download e pré-processamentos do MDE.....	39
8.5 Altitude.....	39
8.6 Declividade.....	40
8.7 Orientação das vertentes.....	40
8.8 Geomorfologia.....	41
8.9 TWI.....	42
8.10 Fator Slope Length.....	43
8.11 Densidade dos canais de drenagem.....	44

<b>8.12 Solos.....</b>	<b>44</b>
<b>8.13 Geologia.....</b>	<b>45</b>
<b>8.14 Variáveis climáticas.....</b>	<b>46</b>
<b>8.15 Variáveis sociodemográficas.....</b>	<b>48</b>
<b>9 Rasterização, reclassificação e reamostragem das variáveis.....</b>	<b>49</b>
<b>10 Mapeamento e tratamento (limpeza), normalização e separação das amostras.....</b>	<b>49</b>
<b>11 Tratamento e exclusão das variáveis através do método RFE.....</b>	<b>50</b>
<b>12 Exclusão e pesos das variáveis a partir da percepção humana (exclusão manual).....</b>	<b>51</b>
<b>13 Aplicação dos métodos de Análise Multicritério (SP - AHP).....</b>	<b>52</b>
<b>14 Aplicação dos métodos Machine Learning: RF/RFE - AHP RF - RF MANUAL.....</b>	<b>52</b>
<b>15 Validação e análise dos modelos.....</b>	<b>52</b>
<b>16 RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
<b>17 Variáveis consideradas pelo método RFE.....</b>	<b>54</b>
<b>18 Variáveis consideradas pelo método manual.....</b>	<b>56</b>
<b>19 Discussões.....</b>	<b>56</b>
<b>19.1 Variáveis antrópicas.....</b>	<b>56</b>
<b>20 Variáveis fisiográficas - Declividade, altitude, slope length, Topographic Wetness Index, orientação das vertentes, Geomorfologia, Solos, pluviosidade.....</b>	<b>67</b>
<b>21 Modelos de susceptibilidade à erosão e validação.....</b>	<b>71</b>
<b>22 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO A- Resultado do modelo AHP com a utilização da variável de solo.....</b>	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da ocupação humana no Planeta Terra, as populações sempre buscaram formas de se adaptar e interagir em meio ao espaço geográfico, modificando a paisagem, sendo essa o resultado de processos e, como afirmado por Ab'saber (2003), “uma herança de processos antigos, remodelados e modificados por processos mais recentes”.

Sendo a paisagem uma realidade viva (Conti, 2014), seus componentes estão em constante transformação, como é visto no relevo terrestre, que a partir de agentes endógenos e exógenos é modelado. Dentre os vários processos ocorrentes no relevo, destaca-se a erosão dos solos, a qual é um processo natural importante para o equilíbrio de determinados ambientes (Guerra; Jorge, 2013).

Embora seja um processo natural, influenciado por fatores como declividade, precipitação, tipos de solos, geologia, dentre outros, a erosão dos solos pode ser intensificada pela ação do ser humano que, como mostrado por CPRM (2014), é acelerada a partir de formas inadequadas de manejo.

A intensificação da erosão promove uma série de impactos socioambientais, sendo o processo erosivo um dos fatores mais influentes na degradação dos solos e, assim, reduzindo a fertilidade das terras agrícolas (Angra e Andrade, 2021). Além disso, a erosão pode contribuir para o desencadear de desastres geológicos como movimentos de massa em áreas mais declivosas; hidrológicos como inundações e, ainda, outras problemáticas como assoreamento dos rios, perda de fauna e flora marinha e terrestre, dentre outras.

Sendo assim, o estudo da erosão dos solos se constitui como parte importante do plano de manejo de bacias hidrográficas, com o qual é possível desenvolver diferentes ações que busquem contribuir para o uso e ocupação das terras a partir de uma lógica conservacionista, que alie uso com conservação, permitindo a seleção da melhor maneira de intervenção da área.

Dentre as várias possibilidades de pesquisa envolvendo a erosão, os estudos relacionados à susceptibilidade aos processos erosivos se constituem como fundamentais para o manejo de bacias hidrográficas. Para execução de tais estudos, vários são os métodos, os quais geram diferentes modelos, onde análises hierárquicas multicritério como *Analytic Hierarchy Process* (AHP), e Sobreposição Ponderada (SP) são utilizadas. Além de tais métodos, as técnicas que envolvem o *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina), vêm sendo aplicadas em diferentes pesquisas.

A partir da existência de vários métodos disponíveis para a geração de modelos de susceptibilidade às erosões, é fundamental que tais métodos, além de aplicados em vários

contextos, sejam avaliados e discutidos comparativamente, o que possibilita a averiguação da eficiência dos modelos gerados. Ressalta-se que os trabalhos de campo e as análises de laboratórios são fundamentais para estudos da temática erosão. Os modelos podem e irão gerar informações que embasam os processos de tomada de decisão, por exemplo.

Considerando essa necessidade, para realização do presente estudo, no qual será aplicado o método AHP, Sobreposição Ponderada e *Machine Learning*, a partir do algoritmo *Random Forest* (RF), foi escolhida a Bacia Hidrográfica do Rio Xopotó (BHRX), localizada na mesorregião da Zona da Mata, em Minas Gerais, que possui grande importância a nível regional, sendo fundamental para o abastecimento de água para os municípios que compõe a bacia, bem como para diversas atividades agrícolas, neste caso de menor expressão econômica, mas que não serão objeto de análise neste estudo.

## 2 PROBLEMA

Para análise da suscetibilidade à erosão podem ser utilizados diferentes tipos de métodos, como por exemplo: análises hierárquicas como o método AHP e Sobreposição Ponderada, bem como das técnicas de *Machine Learning*, como o algoritmo *Random Forest* - RF. Questiona-se: Dentre os métodos e técnicas citadas, qual a mais eficaz para análise de susceptibilidade à erosão na BHRX? O método hierárquico mais complexo (AHP) é, necessariamente, mais eficiente que o mais simples e intuitivo (Sobreposição Ponderada - SP)? A modelagem realizada através do *Machine Learning* é mais eficaz que a modelagem realizada através dos métodos hierárquicos (AHP e SP)? Os modelos gerados por meio do métodos hierárquicos AHP podem contribuir para melhorar o modelo gerado por meio do *Machine Learning* (AHP/RF)? O método RF aplicado a partir das variáveis escolhidas pelo Recursive Feature Elimination (RFE) é mais eficaz quando comparado aos métodos aplicados com as variáveis escolhidas manualmente? Os modelos gerados com uso de *Machine Learning* são melhores se comparados aos manuais, ou seja, os que as variáveis e pesos são escolhidos pelo ser humano? De acordo com o método mais eficaz (a ser encontrado), quais são as características comuns das áreas da BHRX possuem alta susceptibilidade à erosão?

### 3 HIPÓTESE

A partir das características de cada método de análise hierárquica multicritério analisado, tem-se a hipótese de que o método AHP seja o mais eficiente para análise das áreas mais susceptíveis à erosão.

Considerando todos os métodos a serem analisados, tem-se a hipótese que o algoritmo *Random Forest*, aplicado através de técnicas de *Machine Learning* tenha maior eficácia nas análises.

### 4 JUSTIFICATIVA

Pesquisas referentes à erosão da terra são necessárias, visto que existem lacunas importantes nesta área do saber (Poesen, 2017). Nesse sentido, Sahour et al. (2021) mostra que a avaliação da susceptibilidade à erosão é o primeiro passo para planos de conservação do solo.

A partir de estudos que envolvem a espacialização dos locais com maior susceptibilidade à erosão é possível indicar as áreas que devem ser tratadas com maior atenção pelos gestores (Viel et al., 2017), o que contribui para a conservação de bacias hidrográficas e para redução da degradação do solo, por exemplo (Mosavi et al., 2020).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a partir de métodos de análises hierárquicas multicritérios contribuem no processo de tomada de decisão (Malczewski e Rinner, 2015), fornecendo eficácia nas análises das áreas mais propensas à erosão (Arabameri et al., 2019).

Além dos métodos de análises hierárquicas multicritério, as técnicas de *Machine Learning* vêm sendo amplamente utilizadas em pesquisas sobre erosão do solo, como nos trabalhos de Pourghasemi et al. (2020); Saha et al. (2020), sendo que, como mostrado por Lei et al. (2020), as mesmas são consideradas técnicas avançadas em tais estudos, tendo, durante os últimos anos, desenvolvimento significativo nas aplicações em pesquisas relacionadas às áreas de risco.

Apesar da existência de pesquisas que visam mapear áreas mais susceptíveis à erosão em bacias hidrográficas (Santos et al., 2017; Rahmati et al. 2017; Haidara et al., 2019), e também pesquisas que compararam a acurácia de métodos hierárquicos (Mafra et al., 2020), não foram encontrados trabalhos que comparam os métodos de análise multicritérios com as técnicas de *Machine Learning* propostas e, tampouco avançam no sentido de junção da análise

multicritério e *Machine Learning* para análise da susceptibilidade à erosão em bacias hidrográficas.

Dessa forma, essa pesquisa preencherá uma lacuna no conhecimento ao permitir a identificação do método de análise de erosão mais eficaz entre as técnicas propostas. Tal abordagem possibilitará a construção de uma base teórica e prática robusta, que se apresenta como um referencial valioso para conduzir futuros estudos relacionados à susceptibilidade à erosão

Além da contribuição metodológica, este trabalho auxiliará na identificação das áreas mais susceptíveis à erosão na BHRX, contribuindo para contenção dos processos erosivos e auxiliando a busca por formas de manejo mais adequadas às características específicas da bacia.

## **5 OBJETIVOS**

### **5.1 Geral**

Aferir, por meio de análise multicritério e *Machine Learning*, qual método proporciona o modelo de susceptibilidade à erosão laminar na BHRX com maior acurácia.

### **5.2 Específicos**

- a) Montar um banco de dados cartográfico;
- b) Selecionar as variáveis mais relevantes para a análise;
- c) Elaborar modelos de susceptibilidade à erosão laminar do solo;
- d) Avaliar a acurácia dos modelos gerados.

## **6 REFERENCIAL TEÓRICO**

A ciência tem sua maneira de comprovação (ou refutamento) de pressupostos, onde a partir da observação de um fato concreto da realidade, são feitos questionamentos sobre os mesmos, os quais dão origem a uma hipótese, testada a partir da metodologia escolhida, dando origem a resultados. As conclusões seguem esta linha de raciocínio, a experiência e a leitura do responsável pelo estudo (ou responsáveis). O objetivo do método científico não é engessar o estudo, mas criar uma linha de raciocínio coerente, que pode se modificar em função do caminho percorrido.

A partir do estabelecimento da ciência como uma importante forma para o entendimento do mundo, várias áreas do conhecimento emergiram, sobretudo na segunda metade do século

XVIII e meados do século XIX. De acordo com Casseti (2002) as distintas áreas científicas são classificadas, de forma geral, em dois grandes grupos, tendo as ciências destinadas a estudar a natureza, que são as ciências naturais e as destinadas ao estudo do meio social, as chamadas ciências sociais (ou humanas).

Apesar das ciências, de modo geral, serem separadas em duas grandes categorias, sendo elas as naturais e humanas, na Geografia tem-se uma tentativa de *linkar* essas duas perspectivas. Assim, acredita-se que a ciência geográfica consegue cumprir esse papel. Mas, pelo contrário, é visto ao se discutir a epistemologia da Geografia muitos embates envolvendo as correntes do pensamento geográfico. Assim, a Geografia também não foi capaz de construir uma visão unitária, sendo perceptíveis as diferenças de concepção dentro do pensamento geográfico e o embate entre campos epistemológicos distintos e, sobretudo, na dicotomia entre Geografia Humana e Geografia Física.

Claval (2002) ao fazer uma “panorama geral” sobre os vários enfoques epistemológicos ao longo da construção do pensamento geográfico, afirma que “existem várias maneiras de se conceber a Geografia”, onde os pontos de vista, apesar de diferentes, não se excluem totalmente (ou pelo menos não deveriam).

Na verdade, desde sua Gênese, ocasionada a partir do encontro de áreas científicas como as ciências da terra, humanas e biológicas, a Geografia foi dotada de uma complexidade em relação a sua definição conceitual e sua aplicação metodológica e, assim, tendo um caráter heterogêneo, resultando em sua fragmentação (Mendonça, 1996).

A partir disso, vários paradigmas geográficos surgiram, tem-se as mudanças de paradigmas dentro da Geografia, onde, inicialmente, a partir da crítica a uma corrente anterior, uma nova corrente vai surgir. Thomas Kuhn (Kuhn, 1991, p.13) afirma que um paradigma pode ser definido como “as realizações científicas universalmente reconhecidas que, durante algum tempo, fornecem problemas e soluções modelares para uma comunidade de praticantes de uma ciência”. Isso quer dizer que um paradigma é um modelo que é reconhecido universalmente, fornecendo problemas e soluções para a comunidade científica.

Assim, as diferentes perspectivas (ou paradigmas) dentro da Geografia influenciam como a sociedade e a natureza são percebidas dentro dessa ciência, conforme suas diferenças epistemológicas. Portanto, em função destas diferenciações de pontos de vista dentro da Geografia, as suas categorias de análise podem assumir conceitos diferentes a depender da linha de estudo, neste caso, podendo ser considerados conceitos polissêmicos.

A partir desse entendimento, ressalta-se que, no presente projeto a categoria de análise a ser utilizada será a paisagem, com tal discussão sendo versada a partir de autores que auxiliem

no entendimento, sobretudo da relação sistêmica existente entre os diferentes componentes do planeta terra.

O conceito de paisagem, assim como outras categorias analíticas da Geografia, de acordo com Schier (2003), possui divergência no que se diz respeito a sua interpretação conceitual dentro das várias abordagens possíveis dentro da Geografia.

Dentre as várias abordagens a respeito da paisagem, Bertrand (2004) a conceituou como uma porção do espaço geográfico resultante da interação dos elementos biológicos, físicos e antrópicos que, a partir de uma lógica sistêmica formam um conjunto único e indissociável. A partir dessa conceituação, Schier (2003) afirma que Bertrand enxerga a paisagem de forma homogênea, onde a natureza e a sociedade se relacionam entre si em meio ao espaço geográfico.

Assim, em concordância com Bertrand, é possível afirmar que a paisagem é dotada de uma instabilidade, no sentido de que a mesma vem sendo transformada a partir da ação do intemperismo, que ao longo do tempo trará consequências dentro dos ambientes.

Assim, para Ab'Saber (2003), a paisagem está intrinsecamente relacionada com o passado, presente e futuro, perpassando pelas relações dinâmicas da natureza e, a partir da intervenção do ser humano, sofrendo também a influência antrópica. Mesmo sabendo que a escala temporal de atuação da natureza e a do ser humano são diferentes, no tempo presente essas duas forças atuam sobre a paisagem.

A paisagem é dinâmica e reflete, considerando a relação espaço-tempo, diferentes realidades espaciais. Seu entendimento a partir de uma escala cartográfica adequada (considerando o objeto de análise), é fundamental. O estudo de erosões laminares a partir de um processo de modelagem, construído sob diferentes métodos gera importantes informações/dados para um processo de tomada de decisão.

## **6.1 Erosão dos solos**

Devido a sua importância para a sobrevivência da espécie humana, desde os primórdios, sendo tão antiga como a agricultura, os povos nem sempre se preocuparam com a erosão dos solos. Já na mesopotâmia, os processos erosivos foram acelerados por causa da interferência humana, tendo influência direta no assoreamento dos Rios Tigres e Eufrates, bem como no declínio da agricultura naquele local (Bertoni; Lombardi Neto, 2017).

Ainda de acordo com os autores supracitados, devido aos danos causados pela erosão, as civilizações procuraram formas de manejo mais satisfatórias, onde povos como os Hebreus,

mesmo em condições fisiográficas adversas, produziam na Palestina, seguindo suas tradições de plantio e colheita com forte influência religiosa. No Peru, os Incas com seu sistema de terraceamento, onde os terraços eram protegidos com paredes formadas por rochas, e a irrigação feita a partir de aquedutos que transportavam a água por quilômetros, desenvolveram um método de controle de erosão reconhecido como o mais eficiente do mundo, considerando a topografia montanhosa.

De acordo com Poesen (2017), a erosão é um processo onde as partículas do solo são desprendidas de sua localização primária e, em seguida, transportadas para um local secundário. Em ambientes tropicais se destaca a erosão hídrica como principal fator causador da degradação dos solos (Pinto et al., 2020), ocorrendo em duas fases, sendo elas a desagregação e o transporte, respectivamente.

A fase da desagregação pode ser causada pelo impacto direto das águas da chuva no solo desprovido de vegetação (efeito *splash* ou salpicamento). Nesse cenário, as gotas de chuva atingem a superfície com velocidade entre 5 e 15 km/hora, provocando a desagregação das partículas do solo (Lepsch, 2011). Com as partículas do solo desagregadas, as mesmas são transportadas, onde as partículas menores, como o silte e a argila, são transportadas com maior facilidade (Lepsch, 2010), sendo essa a segunda fase de um processo erosivo.

Assim, o efeito *splash*, que ocorre na primeira fase da erosão, desempenha um papel importante na formação de crostas superficiais, também conhecidas como selagem do solo. Essas crostas diminuem a infiltração e, conseqüentemente, aumentam o fluxo de água superficial e assim avolumando (ou intensificando) o transporte de sedimentos, como observado por Guerra e Jorge (2013). Além das duas fases mostradas por Lepsch (2010), Florenzano (2011) ressalta que, após a desagregação e transporte, há a deposição do material nas partes mais baixas do relevo.

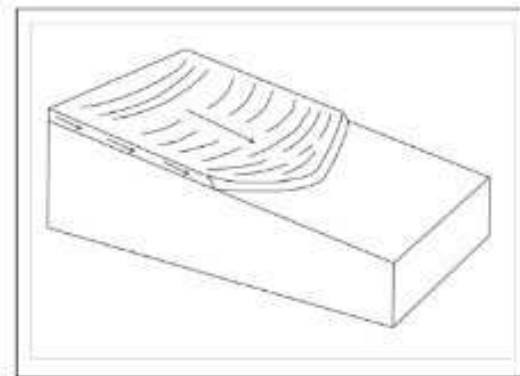
Os processos erosivos podem ser analisados a partir de seus impactos ambientais, esses caracterizados por impactos internos, causados no próprio local de formação da erosão, os chamados efeitos onsite, e os impactos externos ao seu local de origem, que são os efeitos offsite (Marques, 2019).

Dentre os tipos de erosão, no Brasil, erosões laminares e lineares são marcantes (Bigarella, 2003), tendo, de acordo com Rubira et al. (2016), condicionantes como o clima, cobertura vegetal, topografia, atividades antrópicas, dentre outros. Nascimento et al., (2016) mostram que os tipos de processos erosivos podem ser classificados de acordo com sua origem, no caso natural ou antrópica e também pela forma de transporte dos sedimentos, as quais ocorrem de modo difuso, sendo essa uma característica da erosão laminar ou de maneira

concentrada, o que caracteriza as erosões lineares.

A erosão laminar é um processo associado ao escoamento superficial, não tendo a formação de canais (Trindade e Rodrigues, 2016; Filho, 2018), onde os horizontes superficiais do solo são retirados de forma progressiva e homogênea (Muller, 2017; Ferreira, 2008), como mostrado na Figura 1.

**Figura 1-** Atuação da erosão laminar



Fonte: Bigarella 2003

Apesar de evidente na figura 1, que possui caráter representativo, a erosão laminar é pouco perceptível em seu estágio inicial, ocorrendo sem que sejam deixadas marcas observáveis, sendo essa a forma mais lenta da erosão, sendo mais perceptível somente a longo prazo. Em seu estágio mais avançado, é possível perceber a erosão laminar através do abaixamento da superfície do solo, áreas com coloração mais clara, redução de produtividade, enxurrada com um aspecto lodoso e com a exposição das raízes das plantas (Bahia et al., 1992)

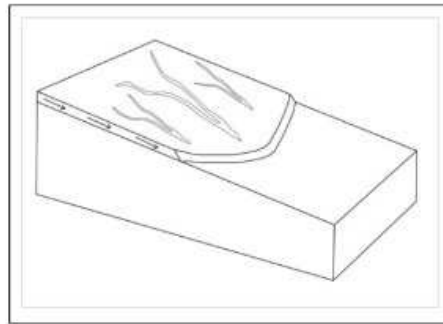
Nas áreas de ocorrência da erosão laminar, as partículas de menor diâmetro irão ser transportadas, as quais são desprendidas dos agregados do solo por meio dos efeitos das gotas das chuvas e, embora nesse tipo de erosão seja perdida menor quantidade de solos (se comparada a ravinas e voçorocas), é visto que nessas partículas menores existe maior concentração de minerais (Bertol et al., 2007), esses importantes para a fertilidade do solo.

Com isso, esse tipo de erosão pode causar muitos prejuízos e, ainda, retirar muita quantidade de sedimentos, o que contribui para o assoreamento de rios, por exemplo (Maiato, 2016). No entanto, a erosão laminar pode ser facilmente eliminada a partir de técnicas de conservação do solo e da água (Gomes et al., 2013).

Caso não sejam aplicadas medidas para a recuperação do solo afetado, a ação erosiva irá continuar atuando, podendo agravar a situação, provocando o aparecimento de outras formas de erosão. Dentre elas tem-se, de acordo com a conceituação utilizada por Lepsch (2011);

Guerra (2021), dois tipos de erosão linear: em sulcos (ravinas) e voçorocas. Assim, a erosão linear irá atuar como mostrado na Figura 2 e, conforme as irregularidades do terreno vão avançando por causa da ação da erosão e tal processo erosivo vai possuindo diferentes características e também distintas nomenclaturas.

**Figura 2-** Atuação da erosão linear



Fonte: Bigarella 2003

A erosão, apesar de ser parte de um processo natural cíclico e equilibrado (Caldas et al., 2019), pode ser intensificada pelo ser humano, causando erosão acelerada (ou erosão antrópica). Dentre as atividades antrópicas que propiciam a ocorrência desse tipo de erosão se destaca, em relação ao uso e ocupação das terras, atividades como a agricultura e a pecuária, por exemplo, as quais não se valendo de práticas de conservação dos solos, promovem a erosão.

Nesse sentido, Rademann (2018), constatou maior ocorrência de erosões em áreas de campo com pastoreio de gado acima da capacidade da carga do solo no município de Cacequi (RS). Ainda, Lima (2012), ao analisar o processo de ocupação da porção meridional do estado do Mato Grosso do Sul, afirmou que, neste local, a erosão antrópica foi um grave dano decorrente da exploração predatória dos recursos naturais.

A erosão acelerada é uma grande, ou senão a maior ameaça aos solos (Govers et al., 2017) é possível afirmar que a ação degradante do ser humano no ambiente promove vários impactos nocivos a todo o planeta terra, tendo, por exemplo, consequências relacionadas com a intensificação dos processos erosivos como a perda de solos agricultáveis (Sun, 2014), pois a erosão propicia a deterioração dos solos em virtude da perda de nutrientes (Mushi et al., 2019). Além da perda de solos, a erosão está intimamente relacionada com processos de inundações, poluição das águas superficiais e subterrâneas e, causando ainda, “alterações nos processos geomórficos e fluxos de sedimentos em uma bacia” (Swarnkar et al., 2018).

Além do ponto de vista fisiográfico, a erosão dos solos é entendida como uma adversidade também com caráter socioeconômico, estando presente em áreas urbanas e rurais (Lisboa et al., 2020), influenciando diretamente na segurança alimentar; impactando consideravelmente o cenário macroeconômico mundial; agindo negativamente no PIB dos países, o que contribui para a piora da qualidade de vida da população, o que caracteriza, em concordância com Guerra (1994), a erosão acelerada como um processo que envolve, além da dimensão fisiográfica, os processos sociais, econômicos e políticos.

Como evidência dessas consequências da erosão dos solos, o relatório da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), intitulado *Status of the World's Soil Resources*, publicado em 2015, mostra que 33% dos solos no mundo estão degradados e, ainda que, a erosão dos solos é responsável pela perda de 25 a 40 bilhões de toneladas de solos por ano. Ainda de acordo com o relatório, aproximadamente 50% dos solos localizados na América Latina estão sofrendo algum tipo de degradação (FAO, 2015).

No Brasil, apesar dos índices de produção serem elevados, devido a abundância de terras, há um evidente descuido, pois as práticas agropecuárias vem aumentando muito, mas de uma forma não conservacionista, deixando por herança em terras agricultáveis o rastro da erosão dos solos (Lepsch, 2011).

A preocupação com a erosão dos solos no Brasil deveria ser grande em virtude não somente do meio biótico, mas também sob o ponto de vista econômico, visto que o país é um grande produtor agrícola e exportador de *commodities* e, se a produção agrícola for conduzida a partir de práticas degradantes, o solo é agredido, o que pode potencializar as manchas e cicatrizes erosivas já existentes, bem como provocar novas áreas erodidas, propiciando perdas nas áreas férteis, demandando maior investimento em novas áreas para plantio (que são finitas) e em fertilizantes.

No município de Campinas, localizado no estado de São Paulo, utilizando dados de um experimento conduzido entre 1987 e 1996, Dechen et al (2015) estimaram as perdas e custos da erosão em diferentes cenários de uso e cobertura da terra. Os autores concluíram que o solo que possuía 90% de cobertura vegetal foi capaz de reduzir as perdas médias de matéria orgânica, água e solo em mais de 50% e, ainda, os custos com fertilizantes em áreas com nenhuma cobertura vegetal foi de US\$ 107,76, enquanto em local com 90% de presença de vegetação foi de apenas US\$ 18,15 por ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Por fim, foi feita a estimativa de que US\$1,3 bilhões são perdidos ao ano somente considerando os custos que a erosão do solo promove, a relacionando com as perdas de nutrientes como P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>.

Considerando os prejuízos causados pela erosão dos solos, é visto que os produtores

deveriam a conter para evitar desperdícios e prejuízos. No entanto, como mostrado por Guerra (1994), é visto que atores das classes com maiores poderes aquisitivos (ou dominantes), possuem o capital necessário para criarem mecanismos que possibilitem os mesmos a aplicarem suas próprias formas de conservação, se ajustando e adaptando em relação à erosão dos solos. No entanto, tais classes, de forma geral, nem sempre estão dispostas a tal, a menos que seu capital seja ameaçado.

Fato “oposto” ocorre em relação a pequenos proprietários, sobretudo de países em desenvolvimento, onde os mesmos, ainda que quisessem ter uma produção que não cause danos ao solo, são “forçados” a causarem a erosão, pois para estes os custos de se ter uma produção conservacionista são proibitivos, o que se agrava quando o estado não participa no intuito de auxiliar esses pequenos empreendedores do ponto de vista técnico e financeiro (Guerra, 1994).

## **6.2 Geoprocessamento, SIG, Sensoriamento remoto e modelos ambientais**

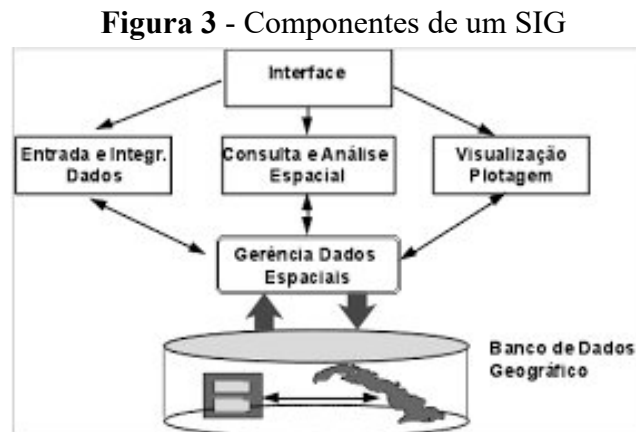
O Sistema de Informação Geográfica (SIG) tem sido amplamente usados em estudos que envolvem os processos erosivos, como no trabalho de Dornellas et al. (2019) o qual, a partir dos parâmetros propostos por Crepani et al. (2001), analisou a vulnerabilidade à erosão em uma bacia hidrográfica localizada no semiárido da Paraíba.

Com seu amplo uso em trabalhos das mais diversas áreas, Fitz (2008) mostra que o termo Geoprocessamento vem sendo utilizado de forma generalizada. No entanto, é fundamental que os termos técnicos e conceituações teóricas sejam utilizadas conforme aquilo que representam. Nesse sentido, o Geoprocessamento pode ser definido como “um conjunto de tecnologias que possibilita a manipulação, análise, modelagem, e visualização de dados georreferenciados”, podendo ser “agregado ou não ao uso de um SIG” (Fitz, 2008).

Dentre as técnicas utilizadas no Geoprocessamento, se destaca o Sensoriamento Remoto (SR) que, “é uma técnica baseada na utilização de dados sobre a superfície terrestre, obtidos sem o contato físico direto entre o sensor e o alvo” (Baptista, 2019). De acordo com Lorenzetti (2015), o SR pode ser aplicado em várias áreas, tendo por exemplo o monitoramento atmosférico; da superfície da terra; dos oceanos e da criosfera terrestre.

Para análise espacial das informações geográficas derivadas do SR, como de vários outros meios, são utilizados os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ou *Geographic Information System (GIS)*, que são um “conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real” (Burroughs 1986; Burroughs e McDonnell, 1998), tendo por características principais “integrar informações espaciais” e

“oferecer mecanismos para análise geográfica” e possui os seguintes componentes: Interface com usuário; Entrada e integração de dados; Funções de análise espacial; Visualização e Geração de Carta; Armazenamento e recuperação de dados (Câmara; Freitas, 1995), como mostrado na Figura 3.



Fonte: (Câmara; Freitas, 1995).

Ainda de acordo com Câmara e Freitas (1995), os componentes mostrados na figura acima se relacionam de forma hierárquica, onde a interface é o mais próximo do usuário e nesse nível hierárquico é definido o modo em que o sistema é operado. Os componentes intermediários dizem respeito àqueles que possuem a “capacidade” de realizar o processamento e consulta dos dados. Por fim, o sistema para gerenciamento do banco de dados geográfico, que é o componente mais interno nessa hierarquia, proporciona o armazenamento dos dados e metadados espaciais.

Dentre as várias possibilidades de uso dos SIG’s, a modelagem de sistemas ambientais é amplamente utilizada para explicar fenômenos complexos (dada a complexidade dos sistemas), de forma simplificada já que, para Christofolletti (1999), um modelo é “qualquer representação simplificada da realidade”, a qual está fortemente vinculada a percepção e compreensão da mesma pelo pesquisador ou pela equipe de trabalho.

Analisar os diferentes componentes físicos e bióticos de uma bacia hidrográfica não é tarefa simples, muito menos fácil. Integrar as diferentes informações, em escala adequada, em modelos ambientais que possam contribuir para os processos de ordenamento territorial, tendo como foco evitar que problemas existentes nos diferentes usos e ocupações da terra sejam um caminho importante e necessário.

Os modelos ambientais podem gerar diferentes opções de análise, evitando o gasto desnecessário de dinheiro público. Por outro lado, os modelos ambientais não substituem a

necessidade de pesquisas *in loco*, da presença dos diferentes profissionais que utilizam esta técnica/método. Além disso, os modelos podem subsidiar a formulação de conceitos ou o aperfeiçoamento dos existentes.

### 6.3 Análise multicritério

A análise multicritério é “uma ferramenta que permite reunir características diversas, atribuir pesos e valores a estas, auxiliando na tomada de decisão” (Francisco et al. 2008, p. 01).

Apesar da existência de diferentes métodos de análise multicritério, é possível afirmar, de acordo com DCLG (2009) que, de forma geral, tal tipo de análise segue uma determinada sequência, ou seja, os mesmos princípios gerais se aplicam às diferentes formas de uso das análises multicritérios.

Assim, já no século XVIII, Benjamin Franklin conseguiu identificar a existência de diferentes variáveis, essas com diferentes pesos, as quais permitem a tomada de decisão por meio da escolha de uma opção em detrimento da outra (Yoon e Hwang, 1995). Tal verificação se confirma na carta abaixo:

Na tarefa tão importante para você, sobre a qual você pede meu conselho, não posso, por falta de premissas, determinar o que pode fazer; mas se você quiser, digo-lhe o que pode ser feito. As dificuldades decorrentes dessas situações devem-se ao fato de não dispormos, a um só tempo, de todos os argumentos prós e contras; podendo surgir um conjunto de argumentos, ou, então, um único fora do contexto. Daí a ocorrência de propósitos ou tendências que prevalecem alternadamente, e a incerteza que nos deixa perplexos. Nessas ocasiões, costumo dividir uma folha de papel em duas colunas, intituladas, respectivamente, “a favor” e “contra”. Durante três ou quatro dias de considerações coloco sob os dois títulos, pequenas dicas sobre os diferentes argumentos que, em ocasiões diversas, ocorrem para mim, contra ou a favor da medida a ser tomada. Quando visualizo todos, esforço-me para estimar seus respectivos pesos; ao encontrar dois – um de cada lado, que pareçam iguais, elimino-os. Se encontro um argumento a favor, igual a dois contra, elimino os três. Se encontro dois argumentos contra iguais a três a favor, elimino os cinco; e, seguindo esse procedimento estabeleço uma medida na qual é obtido o saldo. Depois de um ou dois dias, de novas considerações, se nada de importante ocorrer em qualquer dos lados, chego a uma determinação concordante. Embora o peso dos argumentos não possa ser tomado como quantidades algébricas, mesmo que em cada um seja considerado em separado e comparativamente, e o todo esteja diante de mim, posso julgar melhor, e tenho menos probabilidade de dar um passo equivocado; na verdade, tenho encontrado grande vantagem nesse tipo de equação, que pode ser chamada de Álgebra Moral, ou prudente. Desejando sinceramente que você possa determinar o melhor, disponha sempre meu querido amigo, afetuosamente, B. Franklin. (Founders Online, National Archives, 2002).

A carta acima é considerada um marco na tomada de decisões no século XVIII e foi escrita no contexto em que o cientista Priestley foi convidado a ser o bibliotecário de uma pessoa muito influente, chamada Lord Shelburne. A proposta era financeiramente muito boa, além da possibilidade de trabalhar com Shelburne, uma pessoa capaz e íntegra, que poderia transmitir muito conhecimento a Priestley. No entanto, Priestley tinha uma vida muito confortável na cidade de Leeds, na Inglaterra, e não se via mudando de cidade dentro da Inglaterra. Estando nesse dilema, Priestley enviou um pedido de ajuda para Franklin, o qual propôs como solução o uso da "Álgebra prudencial", como visto na carta. O resultado é que o cientista rejeitou a proposta de Shelburne (Founders Online, National Archives, 2002).

Tal história ilustra de modo didático um exemplo prático de como a análise multicritério (no caso da ilustração, a álgebra prudencial como uma forma de tal análise), com a definição de variáveis e atribuição de pesos a elas, pode contribuir para tomadas de decisões assertivas. Esse tipo de análise pode ser aplicada em diferentes contextos, como administração de empresas, gestão pública e em diferentes estudos, como análises de áreas de risco, erosão dos solos e os mais variados tipos de análises espaciais.

Nas análises espaciais multicritério, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), possuem papel importante, visto que, a partir da combinação de dados geográficos e julgamentos de valor (ou atribuição de pesos por parte do decisor), é possível a obtenção de informações que auxiliarão nas tomadas de decisões (Malczewski, 2006).

Dentre as diversas formas de aplicabilidade da análise multicritério, destaca-se na presente proposta de trabalho o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e a Sobreposição Ponderada.

#### **6.4 Analytic Hierarchy Process (Processo Analítico de Hierarquia)**

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), foi criado por Thomas Saaty, sendo explicado e defendido por seu autor em diversos artigos e, em alguns livros, como o *Decision Making, The Analytic Hierarchy Process*.

De acordo com Saaty, a AHP se comporta como a mente humana, pois, primeiramente organiza as informações para a tomada de decisões a partir de dois enfoques: o dedutivo e o por sistemas.

Ainda de acordo com Saaty, o AHP combina essas duas formas de análise, o que contribui para a compreensão de questões complexas, a partir da organização de um sistema

em partes que se relacionam entre si e, posteriormente, são sintetizadas, possibilitando a verificação do impacto que cada parte exerce sobre o todo.

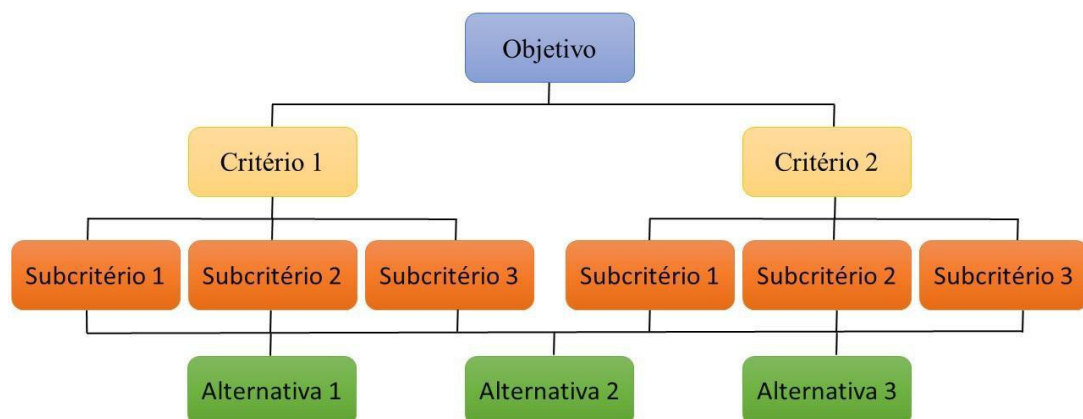
Dessa maneira, o método sistematiza e estrutura grande número de informações em grupos, segundo as suas características, além de permitir decompô-las após análise e sintetizar os elementos através das identificações das relações. Com isso, a partir da construção hierárquica, o AHP proporciona uma visão global das relações complexas relativas ao problema (Schmidt, 1995).

Assim, tal método contribui para tomada de decisão eficaz em frente a problemas complexos, possibilitando a decomposição de uma situação não estruturada em partes (ou variáveis), que são ordenadas em hierarquia, onde o usuário deve definir os pesos das mesmas e, assim estabelecendo a importância da variável, determinando sua influência no resultado final (Saaty, 2014).

Saaty (2008) afirma que para tomar a decisão é preciso seguir as seguintes etapas: Definir o problema; estruturar a hierarquia de decisão; construir um conjunto de matrizes de comparação par a par; a partir das prioridades obtidas nas comparações, pondera-se as prioridades no seguinte nível, até que se chegue no último nível das comparações.

O problema deve ser definido minuciosamente, incluindo a maior quantidade de informações disponíveis para tanto. Depois, a estrutura deve ser estruturada em níveis hierárquicos, onde o nível mais alto dessa hierarquia deve ser o objetivo global. O nível secundário deve ser composto pelos critérios e suas subdivisões (subcritérios), quando houver, e o último nível pelas alternativas (Figura 4).

**Figura 4** – Estrutura do método AHP



Fonte: Saaty, 2014 (Adaptado pelo autor)

Após estabelecer a hierarquia mostrada acima, é preciso julgar os níveis de importância relativa dos critérios, onde os decisores devem atribuir pesos (ou prioridades) aos elementos, quantificando-os em uma escala numérica que se inicia no número 1 e vai até o 9, como visto na Tabela 1. Saaty (2014) argumenta que somente as palavras e o argumento lógico não podem expressar diferenças mais sutis na determinação de pesos, podendo tais diferenças serem expressas através de números.

**Tabela 1-** Tabela Fundamental de Saaty

Escala Numérica	Escala Conceitual	Descrição
1	Igual	Os dois elementos comparados contribuem igualmente para o objetivo.
3	Moderada	O elemento comparado é ligeiramente importante ao outro.
5	Forte	A experiência e julgamento favorecem fortemente o elemento em relação ao outro.
7	Muito forte	O elemento comparado é muito mais forte em relação ao outro, e tal importância pode ser observada na prática.
9	Absoluta	O elemento comparado apresenta o mais alto nível de evidência possível ao seu favor.
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos, utilizados quando o decisor sentir dificuldade ao escolher entre dois graus de importância adjacentes.	

Fonte: Saaty, 2014.

Apesar de ser um método acessível, o AHP é baseado na experiência e julgamentos

feitos pelo usuário, exigindo que o mesmo possua certa experiência em sua área (fenômeno a ser analisado; decisão a ser tomada), pois, para o método oferecer respostas válidas para tomada de decisão, as informações inseridas no mesmo (variáveis a serem consideradas, pesos, etc) precisam ser fidedignas (Saaty, 2014).

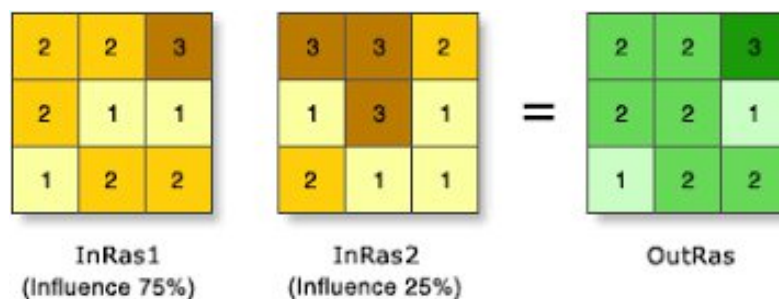
Em relação a confiabilidade das informações, o AHP faz uma prova das consistências das mesmas, onde, os valores que se distanciam do valor perfeitamente consistente, são indicados, para que o usuário melhore os julgamentos. Para um julgamento mais “adequado”, é necessário que os critérios sejam agrupados de acordo com sua homogeneidade e relevância em relação ao objetivo.

### 6.5 Análise de sobreposição Ponderada

A análise de sobreposição é uma técnica que visa criar uma análise integrada a partir da entrada de diferentes dados (ESRI, 2016). A Sobreposição Ponderada consiste na atribuição de pesos aos fatores e notas às variáveis, cujos valores são maiores ou menores dependendo do grau de importância que os fatores e variáveis possuem para dada ocorrência e, de acordo com Silva (2001), apesar de ser um método simples, o mesmo é muito utilizado para análises ambientais e obtém resultados satisfatórios.

A sobreposição ponderada possui três etapas gerais, onde, primeiramente, são atribuídos pesos nas camadas raster (já reclassificados); posteriormente, os pesos de cada atributo dentro de cada raster são definidos em uma escala de classes comum, tendo por padrão os valores de 1 a 9. Por último, todas as camadas são sobrepostas, como mostrado na figura abaixo.

**Figura 5** – Etapas da Sobreposição Ponderada



Fonte: ESRI, 2022.

Como visto na figura acima, cada um dos rasters são ponderados a partir da influência, em porcentagem, onde o raster 01 (InRas1) possui uma influência de 75%, enquanto o raster

2 (InRas2) de 25%. Assim, os valores de cada raster será multiplicado pelo peso dado a cada célula, criando o raster de saída (OutRas). Por exemplo, um pixel no InRas1 possui o valor 2, enquanto um pixel no InRas2 o valor 1. Assim, terá o seguinte cálculo no InRas1 ( $2 * 0.75$ ) = 1.5 e por conseguinte ( $1 * 0.25$ ) = 0.25 no InRas2, criando o OutRas, com pixel no valor de 2, resultado do cálculo ( $1.5 + 0.25 = 1.75$ ) que, nesse caso, foi arredondado para 2.

## 6.6 Machine Learning: Random Forest

O Machine Learning (ML) é uma área relacionada à inteligência artificial (IA), na qual utiliza dados associados a algoritmos, que servem para imitar a forma em que os seres humanos aprendem (IBM, 2020). Assim, o ML é projetado para emular a inteligência humana, a partir da aprendizagem com o ambiente ao redor (Naga e Murphy, 2015), abrangendo uma grande variedade de algoritmos, utilizados em larga escala no processamento de dados (Carleo et al., 2019).

Ainda de acordo com Carleo et al. (2019), o objetivo geral do ML é “reconhecer padrões de dados, que informam o modo como os problemas invisíveis são tratados”, ou seja, em um contexto complexo, onde há a existência de uma gama muito grande de dados (onde existem os problemas invisíveis), os algoritmos são capazes de reconhecer padrões e, assim, gerar informações precisas que auxiliam na tomada de decisão.

Para realizar essa tarefa, de maneira geral, existem duas principais abordagens para que os algoritmos aprendam: aprendizado supervisionado e aprendizado não supervisionado. Em termos simplificados, os algoritmos supervisionados aprendem com dados previamente conhecidos e rotulados, requerendo a intervenção humana (Passos, 2021), enquanto os algoritmos não supervisionados identificam padrões em dados que não possuem rótulos (Amidi e Amidi, 2018), ou seja, dados desconhecidos.

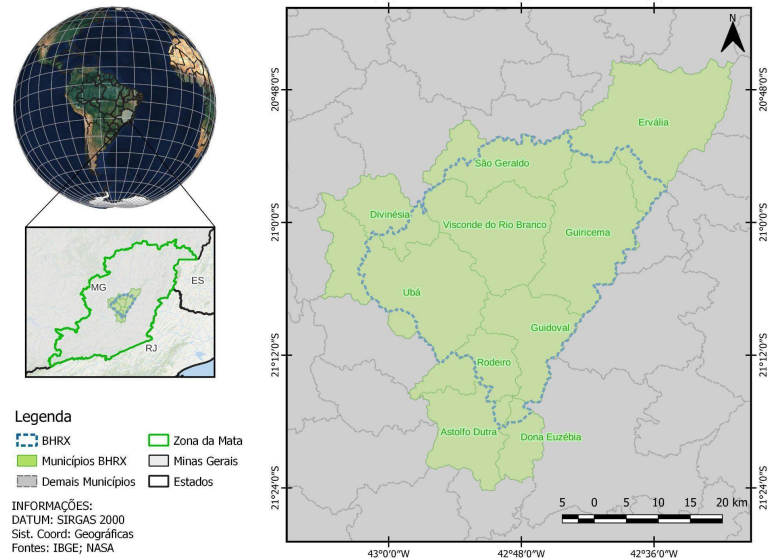
Dentre os variados algoritmos de Machine Learning, destaca-se o algoritmo *Random Forest* (RF), é uma das técnicas mais precisas de aprendizagem de máquina disponíveis (Biau, 2012), o qual é um conjunto de florestas aleatórias onde “cada árvore depende dos valores de um vetor aleatório, este amostrado de forma independente” (Breiman, 2001).

## 7 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A partir do entendimento de que a bacia hidrográfica é uma unidade geográfica ideal para o diagnóstico dos recursos naturais (Grilo; Enami, 2008), a área de trabalho é a BHRX,

que está localizada no estado de Minas Gerais, na mesorregião da Zona da Mata, como mostrado na Figura 6.

**Figura 6 - Mapa de localização da BHRX**



Fonte: Elaborado pelo autor

A BHRX possui área total de 1.260 km<sup>2</sup> e perímetro de 222 km, abrangendo 10 municípios, sendo eles: Ervália, São Geraldo, Guiricema, Visconde do Rio Branco, Divinésia, Ubá, Guidoival, Rodeiro, Astolfo Dutra e Dona Euzébia.

O relevo da BHRX é em sua maior parte acidentado, fato que se justifica pela mesma se localizar em área com predominância do domínio morfoclimático dos Mares de Morros, definido por Ab'Saber (2003).

Em relação às características climáticas, de forma geral, a BHRX está sob influência, de acordo com Sá Júnior (2009), de três classes climáticas, conforme a classificação de Köppen e Geiger (1928), sendo elas Aw, Cwa e Cwb onde, segundo Alvares et al. (2013), a classe Aw é referente ao clima tropical com inverno seco; Cwa subtropical húmido com inverno seco e verão quente; Cwb subtropical úmido com inverno seco com verão temperado.

Como mostrado por Oliveira et al. (2013), na BHRX há a ocorrência de atividades antrópicas não conservacionistas, como por exemplo o uso da terra desordenada, onde há manejo incorreto de pastagens, causando aumento de locais susceptíveis à erosão, contribuindo para a degradação ambiental da bacia.

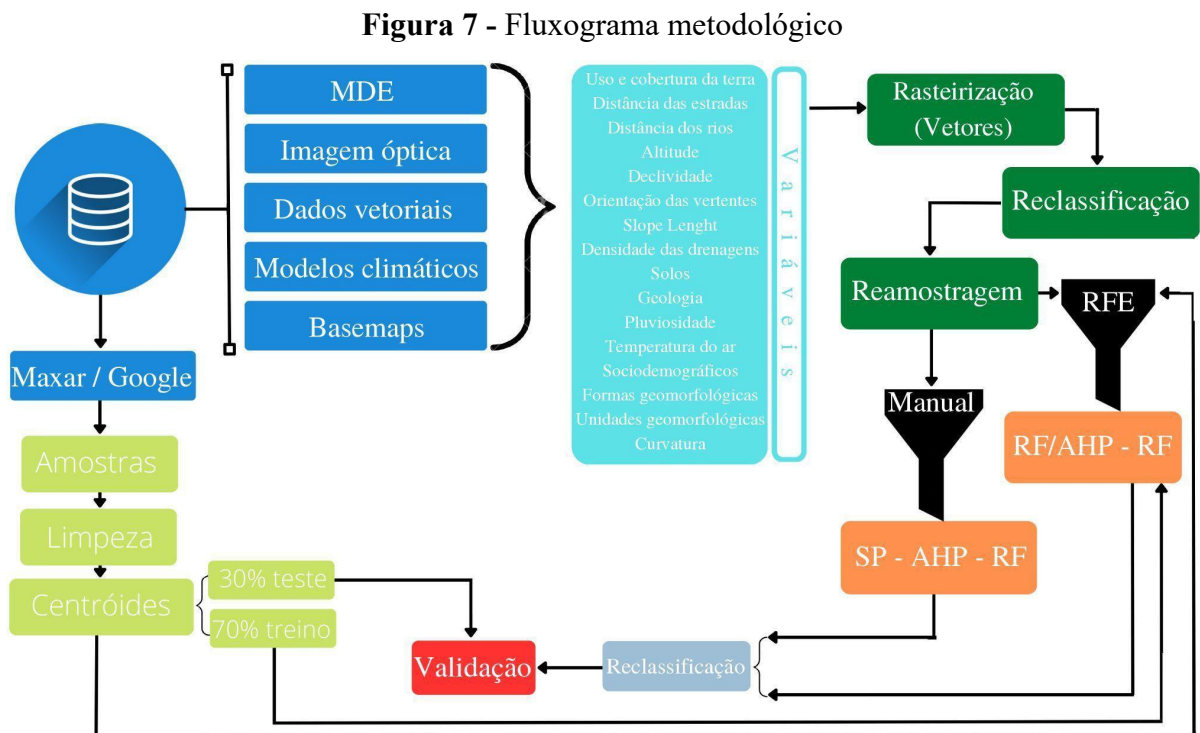
A BHRX foi escolhida para a presente pesquisa pelo fato de já haver estudos pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Geomorfologia do Quaternário / UFV neste local, como o trabalho de Lacerda et.al (2021), o que contribui para que os professores e mestrando

envolvidos na pesquisa tenham conhecimentos prévios sobre a erosão dos solos neste ambiente, o qual é composto pelo domínio de mares de morros, bem como por áreas de escarpa e falhas geológicas.

O conhecimento aprofundado já adquirido é fundamental para as discussões dos resultados, destacando-se especialmente na aplicação de métodos hierárquicos. A utilização efetiva desses métodos depende não apenas da compreensão do fenômeno, mas também do contexto local. Os avaliadores, ao possuírem essa familiaridade, podem atribuir pesos às variáveis de maneira mais informada, enriquecendo assim a qualidade e interpretação dos resultados obtidos.

## 8 METODOLOGIA DA PESQUISA

Os procedimentos metodológicos da presente pesquisa foram divididos conforme o fluxograma contido na Figura 7.



Fonte: Os autores

O fluxograma mostra a existência de um banco de dados, composto pelos dados que foram processados e originaram as variáveis independentes e pela variável resposta, que no caso é o mapeamento das erosões.

No caso, as variáveis independentes são também conhecidas como preditoras ou preditivas, são aquelas inseridas no modelo pelo pesquisador. Já as variáveis dependentes, também conhecidas como variáveis respostas pode ser entendida, como aquelas que possuem influencia das independentes. Em resumo, as variáveis independentes são as que mudamos ou investigamos, enquanto as variáveis dependentes são aquelas que observamos para ver como são afetadas pelas variáveis independentes.

No contexto da pesquisa, as variáveis independentes, também referidas como preditoras ou preditivas, são aquelas que são controladas ou inseridas no modelo pelo pesquisador. Por outro lado, as variáveis dependentes, também conhecidas como variáveis de resposta, são influenciadas pelas variáveis independentes. Em síntese, as variáveis independentes são aquelas que são manipuladas ou investigadas, enquanto as variáveis dependentes são aquelas que são observadas para determinar como são afetadas pelas variáveis independentes.

Também, é evidenciado os processos nos quais as variáveis foram trabalhadas: rasterização, reclassificação e reamostragem. Para gerar os modelos foi preciso definir as variáveis ideais a partir da escolha humana, bem como do método RFE. Com os métodos propostos foi possível gerar os modelos, que foram reclassificados e validados a partir da curva ROC. Para as análises propostas foram utilizados os seguintes *softwares*: R 4.0.5, ArcMap™ 10.7.1; Google Earth Pro 7.3.; QGIS 3.22, de acordo com a necessidade e experiência do autor.

## **8.1 - Banco de dados e variáveis**

Para aplicação das variáveis foi feito um banco de dados com os seguintes temas (Tabela 01): Geologia de Minas Gerais (CODEMIG, 2014); arquivos vetoriais contendo a hidrografia ottocodificada (ANA, 2017) e também as divisões políticas e as bacias hidrográficas (IBGE, 2015); Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus (ESA, 2022); Imagem óptica MSI/Sentinel-2 (ESA, 2021); Imagem óptica disponível no *software* Google Earth Pro (MAXAR/GOOGLE, 2020); Dados de reanálise climática em um período temporal de 30 anos (TERRACLIMATE, 2020; WORLDCLIM, 2020), arquivos vetoriais com informações do Censo Agro (IBGE, 2017) e base de dados do *Open Street Maps*.

As variáveis utilizadas foram definidas com base em trabalhos como os de Ross (1996); Crepani (2001); Arabameri et al. (2019), Pires et al. (2011), Faria et al. (2006), dentre outros. Após a leitura e análise desses trabalhos, as variáveis foram escolhidas usando os seguintes critérios: variáveis comuns nos trabalhos analisados; variáveis que são mais pertinentes, considerando as características da área de estudo. Além das variáveis presentes

nos trabalhos citados, dados sociodemográficos disponibilizados pelo IBGE também foram acrescentados.

Portanto, foram consideradas inicialmente as seguintes variáveis: Uso e cobertura da terra, Distância das estradas rurais, Distância da drenagem, Altitude, Declividade, Orientação das vertentes, Fator *Slope Length*, *Curvatura*, TWI, Densidade dos cursos d'água, Tipos de Solos, Geologia, Pluviosidade, Temperatura, Geomorfologia (feições e unidades geomorfológicas), Total de estabelecimentos agropecuários, Área total dos estabelecimentos, Área de lavoura temporária, Área de lavoura permanente, Atividade pecuária, Atividade de produção florestal, Uso da terra pastagem, Utilização de agrotóxicos, Despesa com agrotóxicos, Utilização de agricultura familiar, como observado na Tabela 2.

**Tabela 2** – Aplicação das variáveis

Variável	Dado	Fonte	Dado de saída	Resolução
Uso e cobertura da terra	Imagem óptica MSI/Sentinel-2, MDE Copernicus	ESA	Categórico	20m
Distância das estradas	Rodovias; vetorização manual, vetor OSM	DNIT; Maxar/Google, OSM	Contínuo	30m
Distância da drenagem	Hidrografia Ottocodificada corrigida	ANA; Maxar/Google	Contínuo	30m
Altitude	MDE COPERNICUS	ESA	Contínuo	30m
Declividade	MDE COPERNICUS	ESA	Contínuo	30m
Orientação das vertentes	MDE COPERNICUS	ESA	Categórico	30m
Fator <i>Slope Length</i> <i>Curvatura</i>	MDE COPERNICUS MDE COPERNICUS	ESA ESA	Contínuo Categórico	30m 30m
TWI	MDE COPERNICUS	ESA	Contínuo	30m
Densidade de cursos d'água	Hidrografia de Minas Gerais	ESA; ANA	Contínuo	30m
Tipos de Solos	Solos de Minas Gerais	Os autores, RADAMBRASIL	Categórico	1:650.000
Geologia	Geologia de Minas Gerais, falhas e fraturas geológicas	CODEMIG; UFOP; IBGE	Categórico	1:250.000

Pluviosidade	Dados de reanálise climática	TerraClimate;Wor IClim	Contínuo	5.000 km
Temperatura	Dados de reanálise climática	TerraClimate;Wor IClim	Contínuo	4.000km
Geomorfologia (unidades e formas)	MDE COPERNICUS; hidrografia de Minas Gerais	ESA; IGAM, IBGE	Catagórico	30m / 1:250.000
Total de estabelecimentos agropecuários	Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal
Área total dos estabelecimentos	Censo Agro 2017 Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal
Área de lavoura temporária	Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal
Área de lavoura permanente	Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal
Atividade pecuária	Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal
Atividade de produção florestal	Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal
Uso da terra pastagem	Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal
Utilização de agrotóxicos	Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal
Despesa com agrotóxicos			Catagórico	Municipal
Utilização de agricultura familiar	Censo Agro 2017	IBGE	Catagórico	Municipal

---

Fonte: Elaborado pelo autor

Ressalta-se que, devido a indisponibilidade de dados na mesma escala de trabalho e/ou em escala adequada cartograficamente para a BHRX, existem no banco de dados, informações/dados com resoluções espaciais/escalas diferentes, sendo que o dado com maior resolução espacial é o uso da terra, que foi derivado de imagem do satélite Sentinel-2, com resolução espacial de 20 metros e os dados com menor resolução espacial são os dados climáticos, os quais possuem resolução espacial de aproximadamente 5 km e sociodemográficos, que são coletados a nível municipal, gerando assim uma generalização para toda a área do município.

Em função desta diferenciação na resolução espacial dos dados, os mesmos foram reamostrados para uma resolução espacial de aproximadamente 30 metros, que é a resolução

do MDE Copernicus, do qual se deriva grande parte dos dados do presente estudo, justificando assim a escolha da reamostragem a partir do MDE. Apesar dessa justificativa, sabe-se que, mesmo com a reamostragem, os dados de menor resolução espacial (como o de precipitação), ainda serão muito generalizados para a escala de trabalho (1:250.000), a qual considera a extensão BHRX. No entanto, considera-se que, mesmo não havendo uma “melhora” nos dados com a reamostragem esse procedimento possibilita que haja a interação entre os dados, viabilizando a realização da modelagem espacial.

## 8.2 Uso da terra

A variável UCT permite que seja identificadas as atividades antrópicas realizadas em determinado local, relacionando-as com as características fisiográficas da paisagem, já que, de segundo Odunuga et al. (2018), o uso e práticas de gestão da terra possuem grande impacto sobre os recursos naturais, tendo por exemplo o solo, água, plantas, dentre outros.

Como visto na tabela acima, para confecção do mapa de uso e ocupação das terras, foi utilizada a imagem óptica *MSI/Sentinel-2*, com resolução espacial de 10 metros nas bandas *Blue* (B2); *Green* (B3); *Red* (B4) e na faixa do Infravermelho Próximo ou *Near Infrared* (B8), possibilitando a realização de diferentes composições de bandas, no espectro visível (cor verdadeira), em combinações de falsa cor, bem como em aplicação de índices de vegetação como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), por exemplo.

A imagem *Sentinel-2*, “S2B\_MSIL2A\_20220617T130249\_N0400\_R095\_T23KQS\_20220617T152354” é datada do dia 17 de junho de 2022. A escolha da data se justifica pelo fato de que nesse período do ano tem-se na região temperaturas mais baixas e ar mais seco, o que, considerando a sazonalidade da vegetação, evidencia as áreas de solo exposto, por exemplo.

Para download da imagem, foi utilizado o site <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, operado pela *European Space Agency* (ESA). Sabendo da existência de diferentes níveis de processamento existentes na imagem Sentinel - 2, foi escolhido o nível 2A, que já possui correção atmosférica.

De acordo com ESA (2022), esse nível de processamento é obtido através de algoritmos de *Scene Classification*, que fornece um mapa de classificação, detectando quatro tipos diferentes de nuvens; seis classificações de sombras; sombras de nuvens; vegetação; solos; água e neve. Após esse procedimento, é feita a correção atmosférica a partir das reflectância do Topo da atmosfera (TOA), encontradas nas imagens nível 1C, calcula a

reflectância da parte inferior da atmosfera ou *Bottom Of Atmosphere* (BOA).

Para tal procedimento, é utilizado pacote *Library for Radiative transfer* (LibRadtran), a partir do modelo de transferência radiativa uvspec, que originalmente foi projetado para “calcular a irradiância espectral e o fluxo actínico nas partes ultravioleta e visível” (Kylling, 1992; May; Kylling, 2005). No entanto, após muitas melhorias, o uvspec pode calcular a energia solar, espectro térmico e temperatura de brilho, além de fornecer ao usuário muitas opções para análises atmosféricas (Mayer; Kylling, 2005; Mayer, 2020).

As classes de uso e ocupação da terra foram definidas a partir do objetivo de tal dado no presente estudo, bem como das características da BHRX, tendo assim, as classes de Mata, Pastagem, Solo Exposto, Água, Agricultura e Área construída. Para classificação do uso e cobertura da terra foi utilizado o método Random Forest, a partir do *software* R. As variáveis utilizadas para geração do modelo foram as bandas 02, 03, 04, 05, 06, 07, 8A, 11, 12, 08 da imagem Sentinel-2, bem como variáveis provenientes do MDE como altitude, orientação das vertentes, declividade, TWI e também índices de vegetação como NDVI, NDWI, SAVI, todos reamostrados para a resolução espacial de 20 metros. Após a execução dos procedimentos e aplicação do algoritmo Random Forest, o modelo passou por uma filtragem pós classificação com o uso do software QGIS. Para validação da acurácia do modelo foi aplicado o índice de precisão global.

### 8.3 Distância das estradas e dos rios

Para cálculo da variável de distância das estradas, as mesmas foram obtidas através do plugin OSM *Downloader*. Esta ferramenta faz o *download* de todas as feições de linhas encontradas na base de dados da *Open Street Maps* (OSM) para a área desejada, dando como resultado um arquivo vetorial. Após a aquisição desse vetor de linhas, o mesmo foi filtrado manualmente, ou seja, somente as linhas que correspondem às estradas rurais foram mantidas e as estradas não captadas automaticamente foram vetorizadas em tela.

A base de dados para “DR” foi obtida através do arquivo vetorial dos cursos d’água Ottocodificados, disponibilizado pela ANA (2017). Tal base de dados foi corrigida manualmente a partir das imagens MAXAR / GOOGLE. Para o cálculo da “DE” e “DR”, foi utilizada a ferramenta de cálculo da distância euclidiana (*Euclidean Distance*), a qual calcula a distância euclidiana de um ponto de origem até a fonte mais próxima (ESRI, 2021).

#### 8.4 *Download* e pré-processamentos do MDE

Para obtenção dos dados referentes às variáveis de altitude, declividade, orientação das vertentes, radiação solar, slope length e geomorfologia foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM, gerado pela *European Space Agency* (ESA). Esse MDE global se baseou nos dados de radar da missão TanDEM-X e foi feito entre os anos de 2011 e 2015 (AIRBUS, 2020), possuindo dados com 90 e 30 metros de resolução espacial, disponibilizados publicamente em 2019 e 2021, respectivamente (ESA, 2021).

O MDE Copernicus foi escolhido porque possui dados mais recentes, esses coletados entre 2011 e 2015, ao contrário do NASADEM, por exemplo, que é baseado nos dados da missão SRTM, realizada em 2001. Também, de acordo com Guth e Geoffroy (2021), o MDE Copernicus supera outros MDE's globais com resolução espacial de 1 arco de segundo, como o ALOS, ASTER, NASA e SRTM. Para fazerem tal afirmação os autores compararam tais MDE's com dados provenientes de LiDAR e ICESat-2 em oito áreas distintas e, em todas, o Copernicus se mostrou superior aos demais MDE's globais.

O MDE com resolução espacial de 30 metros foi baixado do site <https://panda.copernicus.eu/>, no formato de arquivo *Defense Gridded Elevation Data* (DGED), no qual os valores estão em números decimais (float), o que representa terreno de forma mais fidedigna, se comparado com o *Digital Terrain Elevation Data* (DTED), onde os dados de elevação estão em valores inteiros (Integer).

Após o *download* das imagens, no *software* QGIS foram realizados os pré-processamentos, iniciando com o mosaico das imagens e, posteriormente, foi recortado usando uma camada vetorial da delimitação da BHRX como máscara. A camada resultante desse recorte foi convertida para o sistema de coordenadas planas, no caso, o Universal Transversa de Mercator Zona 23s, com o DATUM SIRGAS 2000, que possui o código SRC EPSG:31983. Após esses procedimentos o MDE ficou preparado para procedimentos posteriores e geração de variáveis do relevo.

#### 8.5 Altitude

A altitude foi gerada a partir das informações contidas no MDE, que foi reclassificado, possibilitando a categorização das classes. Para a reclassificação, após testes com diferentes parâmetros estatísticos, considerou-se a sua realização através de classificação manual, a partir das experiências do grupo, bem como do conhecimento da compartimentação

topográfica do relevo local.

## **8.6 Declividade**

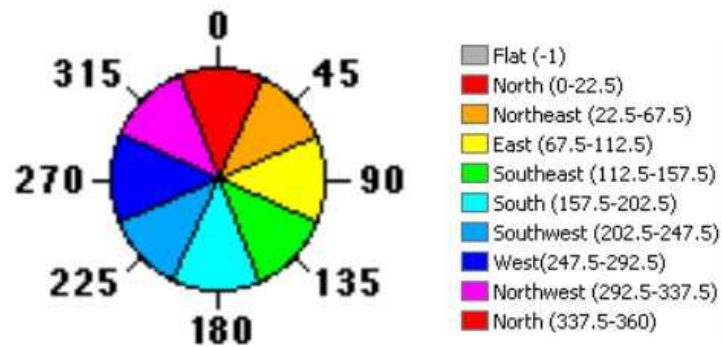
Os valores referentes ao declive foram obtidos através do MDE, que serviu como parâmetro de entrada à ferramenta “Declividade”, gerando um modelo mostrando os valores de declividade em porcentagem, que foi reclassificado seguido a classificação feita pela Embrapa (1979).

Em tal classificação, na superfície plana, os desnivelamentos são muito pequenos; na suave ondulada, já são apresentados declives, mesmos que suaves, já tendo colinas e outeiros; a superfície ondulada também é constituída por colina e outeiros, no entanto, os mesmos já possuem um maior declive se comparada à superfícies suave ondulada. Na superfície forte ondulada, já há a existência de morros com elevações de aproximadamente de 100m a 200m, enquanto em áreas com topografia montanhosa há a predominância de formas acidentadas, sendo compostas por morros e maciços montanhosos com grandes desniveis. Por fim, o relevo escarpado se refere àquele com declive muito forte, nos quais predominam formas abruptas, como é possível observar nos vales encaixados, por exemplo (EMBRAPA, 1979).

## **8.7 Orientação das vertentes**

A orientação das vertentes foi gerada a partir da ferramenta Aspect, que proporciona a identificação da direção em que a vertente está inclinada. Para esse parâmetro, a orientação é definida conforme o azimute de cada célula, medido em graus, variando de 0 a 360, fazendo um círculo completo e -1 para as áreas planas (ESRI, 2021). Um exemplo pode ser observado na Figura 8.

**Figura 8** – Funcionamento da ferramenta aspect



Fonte: ESRI, 2021 (adaptado pelo autor)

Na Figura 8 é possível observar os valores de azimute para cada direção cardinal de orientação das vertentes. Para a reclassificação mostrada acima, inicialmente, utiliza-se os pontos cardiais e colaterais (8 faces), a partir dos valores de azimute, que vai de 0° até 360°. Assim, sendo 8 faces, divide-se o azimute (360°) por 8, que é o número dos pontos cardiais e colaterais, o que dará um ângulo de 45° de azimute por classe. No entanto, precisa-se fazer um ajuste, para que as faces de orientação das vertentes fiquem representadas da maneira correta, pois originalmente, a face norte teria início no azimute 0°, no entanto, isso não representaria a realidade, pois a face norte começaria no zero e abarcaria até os 45° e, assim, englobaria a face nordeste, gerando um erro sistemático para todas as outras faces.

Assim, no caso da direção norte, faz a divisão do ângulo de 45° por 2, gerando o valor de 22,5°, que será a orientação norte inicial. Assim, é possível calcular os demais ângulos, onde face nordeste tem um valor de 22,5° até 67,5°, que é a soma de 22,5° e 45° (valor do azimute). Assim, soma-se da maneira anterior para todos os ângulos, chegando novamente na face norte, que neste ponto irá do 337,5 até 360°, completando a outra metade do ângulo de 45° da face norte, que ao final irá de 337,5° até 22,5°.

## 8.8 Geomorfologia

A variável das formas geomorfológicas foi identificada através da utilização da ferramenta R.Geomorphon, presente no QGIS. As unidades geomorfológicas foram obtidas através da classificação geomorfológica feita pelo IBGE. Tais dados serão analisados a partir do Manual Técnico de Geomorfologia - IBGE. Assim, a partir da normatização contida neste

manual, os autores utilizaram seus conhecimentos de campo, bem como conhecimento científico e experiência na área de geomorfologia, para discussão das classes geomorfológicas contidas na BHRX.

## 8.9 TWI

O Topographic Wetness Index (TWI) mostra a umidade do solo, bem como as áreas saturadas de água em uma bacia hidrográfica (Mosavi et. al, 2020). De maneira geral, as áreas mais propensas ao maior acúmulo de água, essas que possuem pouca inclinação, apresentam altos valores de TWI, enquanto, áreas com declives mais acentuados, mais secas e mais drenadas, possuem baixo valor de TWI (Mattivi, 2019). Originalmente o TWI foi proposto por Beven e Kirby (1979) a partir da Equação 01.

$$TWI = \ln \frac{AC}{\tan\beta} \quad (1)$$

Onde:

AC=Área de contribuição;

$\beta$ = Declividade.

Baseado no trabalho de Mattivi et. al. (2019), para cálculo do TWI, foram utilizadas ferramentas presentes no *software* SAGA-GIS, como a “*Topographic Wetness Index (TWI)*”, que usa como camada de entrada o raster de declividade (em radianos), para B(beta) e inserido o acúmulo de fluxo para AC.

Antes da utilização da ferramenta citada acima, é preciso obter os parâmetros de entrada. Assim, para gerar a área de contribuição, foi preciso realizar a correção dos pixels (depressões) do MDE, a partir da ferramenta “*Fill Sinks (Wang e Liu)*”, que gerou como saída o MDE corrigido. Com o MDE já corrigido, foi usada a ferramenta *flow accumulation (top-down)* para gerar a acumulação de fluxo. Após esse procedimento, foi gerada a área de captação específica (AC), com o uso da ferramenta “*Flow Width and Specific Catchment Area*”, onde, nessa ferramenta tem por parâmetro de entrada o raster de elevação corrigido, bem como o raster de acúmulo de fluxo. Ainda, é preciso calcular a declividade em radianos, que é o parâmetro B(Beta) e, para isso foi utilizada a ferramenta “*Slope, Aspect, Curvature*”, tendo como arquivo de entrada o MDE original (não corrigido), e usando o método “*least*

squares fitted plane” (horn, 1981, Costa Cabral e Burgess, 1996), com o unidade de saída em radianos, como necessário para geração do TWI.

De posse dos arquivos raster com informações referentes aos parâmetros a serem utilizados para geração do TWI, foi utilizada a ferramenta “*Topographic Wetness Index (TWI)*”, sendo colocado por entrada os arquivos de declividade e área de captação específica, gerados anteriormente. O método usado para geração do TWI é o Standard, como visto no artigo de referência.

### 8.10 Fator Slope Length

O fator Slope Length é um dos fatores usados na USLE, o qual utiliza o fator L, que é o comprimento da rampa (ou declive) e o S, que é o fator de inclinação (Michigan University). Com esses parâmetros é possível a obtenção do efeito do comprimento do declive e o efeito da inclinação do declive (Michigan University), mostrando assim o efeito da topografia na erosão do solo (ESDAC, 2022).

Para cálculo da variável do fator Slope Length (LS) (Fator topográfico), foi utilizado o MDE Copernicus (ESA, 2022), que servirá como arquivo de entrada da ferramenta *LS-factor, field based*, disponível na extensão SAGA-GIS, presente no *software* QGIS.

A ferramenta foi utilizada a partir do método de cálculo do fator LS, proposto por Desmet e Govers (1996), os quais, baseados em estudos anteriores, desenvolveram um algoritmo para calcular o comprimento de rampa (Fator L), a qual é estimada a partir da acumulação de fluxo. Assim, o fator LS é obtido como produto do comprimento de rampa (L) pela declividade (S) (Farinasso et al., 2004), de acordo com a equação 2.

$$LS_P = \left[ \frac{a \cdot l}{22,13} \right]^{0,4} \cdot \left[ \frac{s}{0.0896} \right]^{1,3} \quad (2)$$

Onde:

$LS_P$  = Fator LS derivado da potência de escoamento       $s$  = Gradiente de declividade

$a$  = Fator de forma da vertente

$l$  = Distância longitudinal da unidade de contribuição hidrológica

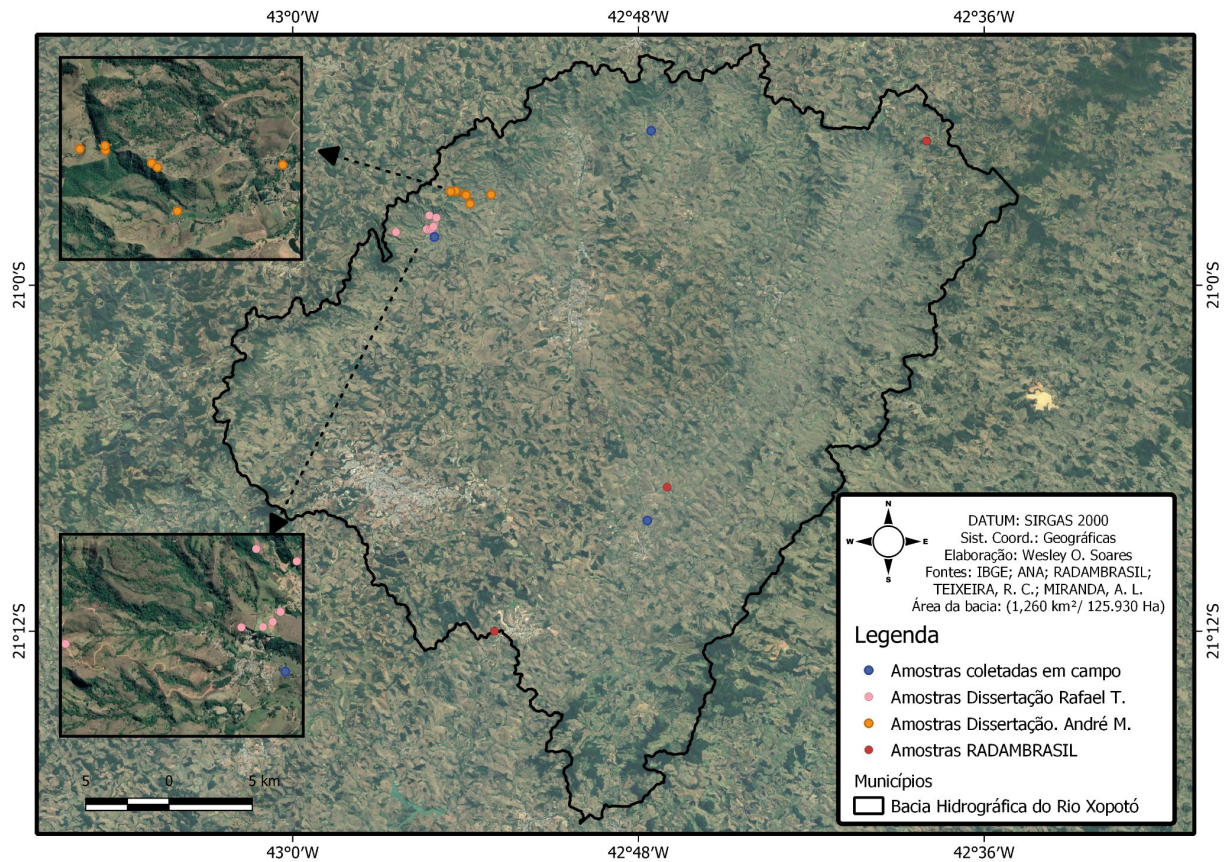
### 8.11 Densidade dos canais de drenagem

O parâmetro “DD” foi aplicado com o uso do arquivo vetorial de drenagem, por meio da ferramenta “*Kernel Density*”, presente no *software* ArcGis, a qual tem seus maiores valores próximos a linha (quando o input é uma linha), e a medida que se afasta da linha esse valor diminui (ArcGis, 2022). Na ferramenta, o arquivo de entrada (input) foi o shapefile dos cursos d'água corrigidos o qual possui por geometria a linha. Na ferramenta foi colocada a opção da unidade de medida da área de Square Kilometers, o que propiciou um arquivo de saída com a unidade de medida km/km<sup>2</sup>. Posteriormente, o raster resultante do procedimento anterior foi reamostrado para 30m com o uso da ferramenta resample, com a área exata da bacia sendo extraída com a ferramenta extract by mask.

### 8.12 Solos

Para esta variável foi baixada a classificação de solos feita pela UFV, em escala 1:650.000, a qual foi recortada e processada no software QGIS. Além desse dado, para melhor análise desta variável foram utilizados dados do projeto RADAMBRASIL, teses e dissertações com coleta de amostras na área de estudo, bem como a partir de trabalho para reconhecimento do solo do local. O trabalho de campo foi realizado no dia 18 de outubro de 2022, sendo que a escolha dos locais a serem amostrados (Figura 9) foram baseados no conhecimento que os pesquisadores possuem sobre a área.

**Figura 09 - Espacialização das amostras de solo**



Fonte: Os autores

Para a coleta dos solos, os perfis foram abertos e em seguida foi feita a identificação dos horizontes e características do solo, a partir da observação de elementos como sua cor, porosidade e capacidade de infiltração e, em seguida para a coleta foi utilizada um trado, colocando o solo no saquinho e o identificando. Em seguida, os perfis dos solos foram colocados para secar, sendo essa etapa muito importante para que em seguida o solo seja macerado e depois coado em peneira de 2 cm, para realização de diferentes análises, sendo elas a análise física (granulométrica, classificação textural e tipo de solo) e química de rotina, sendo analisados itens como ph em água, P, K, Ca<sup>2+</sup>, dentre outros. Apesar dessas amostras não serem suficientes para criação de um mapa de solos da BHRX, as mesmas foram importantes para entender melhor a área de estudo.

### 8.13 Geologia

A Geologia foi obtida por meio de arquivo gerado pelo levantamento do IBGE, este disponível no site da UFMG, em escala 1:250.000. Apesar de existirem levantamentos em

escala 1:100.000, os mesmos não abarcam toda extensão da BHRX e, assim, tendo que ser utilizado a informação em uma escala menor.

#### 8.14 Variáveis climáticas

A variável relacionada à precipitação, foi obtida a partir dos dados de reanálise *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), que possui uma resolução espacial de 5 km, tendo dados desde o ano de 1981 até a atualidade, com os dados sendo disponibilizados em diferentes soluções temporais (Costa et al, 2019).

Para gerar os dados de reanálise na escala mostrada acima, o CHIRPS utilizam os dados internos, chamados de *High-quality monthly rainfall climatology* (CHPclim), imagens de satélite e também estações climáticas, onde, no Brasil, somente na última versão, foram adicionadas mais de 11.000 novas estações (University of California, 2022). Os dados do CHIPS estão disponíveis para *download* no site <<https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>>, sendo disponibilizados em formato .tif, .foi e .netcdf.

Foram baixados os modelos climáticos anuais referentes ao intervalo de anos que varia de 1992 a 2021, totalizando 30 anos, para que seja confeccionada uma normal climatológica. Após o *download*, no site supracitado, os arquivos foram abertos no *software* QGIS e, em seguida, recortados para a área de estudo, a partir da ferramenta cortar (processamento feito em lote). Com os arquivos já recortados para a área de estudo, foi realizado o cálculo da média, a partir da seguinte expressão.

$$("rec\_1992@1" + "rec\_1993@1" + "rec\_1994@1" + "rec\_1995@1" + "rec\_1996@1" + "rec\_1997@1" + "rec\_1998@1" + "rec\_1999@1" + "rec\_2000@1" + "rec\_2001@1" + "rec\_2002@1" + "rec\_2003@1" + "rec\_2004@1" + "rec\_2005@1" + "rec\_2006@1" + "rec\_2007@1" + "rec\_2008@1" + "rec\_2009@1" + "rec\_2010@1" + "rec\_2011@1" + "rec\_2012@1" + "rec\_2013@1" + "rec\_2014@1" + "rec\_2015@1" + "rec\_2016@1" + "rec\_2017@1" + "rec\_2018@1" + "rec\_2019@1" + "rec\_2020@1" + "rec\_2021@1") / 30$$

Onde “rec \_” faz referência a imagem recortada, “1992” é o ano da imagem e “@1” é a banda da imagem (que só tem uma banda, por isso o numeral 1).

Na sequência o dado de saída foi projetado para o sistemas de coordenadas SIRGAS 2000 UTM 23S e reamostrado para uma resolução espacial de 30 metros, a partir do método

Bilinear, que é ideal para dados contínuos, com o uso da ferramenta project raster, disponível no ArcGis.

Já os arquivos para análise da temperatura, foram escolhidos os dados provenientes da plataforma Terra Climate. Tal plataforma abriga variados dados ligados ao clima, onde todos os dados possuem uma resolução temporal mensal, bem como resolução espacial de aproximadamente 4 km. Para os dados de temperatura aqui utilizados, a plataforma possui dados até o ano de 2021. Para gerar tais dados, o projeto TerraClimate usa uma interpolação que combina normais climatológicas de alta resolução, bem como dados de outras plataformas, como o World Clim e CRU Ts4.0, por exemplo (TERRACLIMATE, 2021). Os dados do terraclimate foram baixados do site [https://climate.northwestknowledge.net/TERRACLIMATE/index\\_directDownloads.php](https://climate.northwestknowledge.net/TERRACLIMATE/index_directDownloads.php), onde foi possível baixar os arquivos Raster no formato NetCdf, os quais foram abertos no QGIS e, após os procedimentos detalhados em seguida, foram convertidos para o formato GeoTiff.

Após recortar a área de interesse, em função dos arquivos do Terra climate estarem com dados mensais, ou seja, cada raster anual possui 12 bandas, essas referentes aos 12 meses do ano, foi preciso calcular a média anual, transformando esse arquivo de 12 bandas para um raster com apenas uma banda, essa contendo a média anual. Para tanto utilizou a seguinte expressão, para cada um dos anos, com os dados de temperatura mínima e máxima. Abaixo segue o exemplo do ano de 1992.

$$("temp\_min\_1992@1" + "temp\_min\_1992@2" + "temp\_min\_1992@3" + "temp\_min\_1992@4" + "temp\_min\_1992@5" + "temp\_min\_1992@6" + "temp\_min\_1992@7" + "temp\_min\_1992@8" + "temp\_min\_1992@9" + "temp\_min\_1992@10" + "temp\_min\_1992@11" + "temp\_min\_1992@12") / 12$$

onde “temp\_min” é o nome do arquivo; “1992” o ano e o número após o “@” corresponde ao mês.

Assim, tal procedimento foi feito para todos os anos (1992 a 2021), com os dados de temperatura mínima e máxima, através da calculadora raster (procedimento em lote) presente no QGIS. Após feito tal procedimento, foi obtido os arquivos raster contendo a média anual.

Com os dados já estando na média anual, para obtenção da normal climatológica, foi feita a média em 30 anos a partir da seguinte expressão:

$$("TMIN\_media\_1992@1" + "TMIN\_media\_1993@1" + "TMIN\_media\_1994@1" + "TMIN\_media\_1995@1" + "TMIN\_media\_1996@1" + "TMIN\_media\_1997@1" + "TMIN\_media\_1998@1" + "TMIN\_media\_1999@1" + "TMIN\_media\_2000@1" +$$

"TMIN\_media\_2001@1" + "TMIN\_media\_2002@1" + "TMIN\_media\_2003@1" +  
 "TMIN\_media\_2004@1" + "TMIN\_media\_2005@1" + "TMIN\_media\_2006@1" +  
 "TMIN\_media\_2007@1" + "TMIN\_media\_2008@1" + "TMIN\_media\_2009@1" +  
 "TMIN\_media\_2010@1" + "TMIN\_media\_2011@1" + "TMIN\_media\_2012@1" +  
 "TMIN\_media\_2013@1" + "TMIN\_media\_2014@1" + "TMIN\_media\_2015@1" +  
 "TMIN\_media\_2016@1" + "TMIN\_media\_2017@1" + "TMIN\_media\_2018@1" +  
 "TMIN\_media\_2019@1" + "TMIN\_media\_2020@1" + "TMIN\_media\_2021@1") / 30

onde “TMIN\_media” é o nome do arquivo, seguido pelo seu ano, como por exemplo, 1992 e o “@ 1” significa que o arquivo possui apenas uma banda.

Vale ressaltar que a expressão acima representa os dados referentes a temperatura mínima, sendo que tal procedimento foi realizado com os dados de temperatura mínima e temperatura máxima. Por fim, para obter-se a temperatura média, os dados de temperatura mínima e máxima foram somados e divididos por dois.

Após a obtenção do arquivo contendo a normal climatológica, o mesmo foi projetado para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 UTM 23S e reamostrado para resolução espacial de 30 metros, a partir do método Bilinear.

### 8.15 Variáveis sociodemográficas

As variáveis sociodemográficas são provenientes do Censo Agro (IBGE, 2017), disponível em escala municipal e foram baixadas da plataforma SIDRA. Após baixado o arquivo Shapefile que contém, em sua tabela de atributos, os dados referentes ao Censo Agro, foram escolhidos os dados de interesse para a presente pesquisa, que foram os seguintes:

V1 - Total de estabelecimentos Agropecuários - Total de estabelecimentos agropecuários, por município; V2 - Área média de estabelecimentos agropecuários (ha) - Quociente entre a área total e a quantidade de estabelecimentos agropecuários localizados no município; V8 - Atividade de lavoura temporária (%) - Percentual de estabelecimentos pertencentes ao Grupo de Atividade Econômica Produção de lavouras temporárias, em relação ao total de estabelecimentos agropecuários do município; V9 - Lavoura permanente (%) - Percentual de estabelecimentos pertencentes ao Grupo de Atividade Econômica Produção de lavouras permanentes, em relação ao total de estabelecimentos agropecuários do município; V10 - Atividade pecuária (%) - Percentual de estabelecimentos pertencentes ao Grupo de Atividade Econômica Pecuária, em relação ao total de estabelecimentos agropecuários do município; V13 - Atividade de produção florestal (%); V17 - Uso das terras - Pastagem; V34 -

despesa de agrotóxicos (%) e V38 - Agricultura familiar (%).

Após escolha dessas variáveis, o arquivo ahp foi recortado para a BHRX e projetado para o sistema SIRGAS 2000 UTM 23S; em seguida foi convertido para o formato raster considerando para cada uma das variáveis e, depois reclassificado utilizando o método estatísticos das quebras naturais, o qual é muito indicado para dados de população.

## **9 Rasteirização, normalização e reclassificação e reamostragem das variáveis**

O banco de dados da presente pesquisa é composto por variáveis contínuas e categóricas, como já evidenciado na Tabela 2. Para uso nas estatísticas de exclusão de variáveis, as categóricas foram reclassificadas, para que as mesmas sejam analisadas em uma mesma dimensão numérica, ou seja, variáveis que possuem diferentes informações de medidas, foram transformadas para números em comum. Assim as variáveis demográficas do Censo Agro foram divididas em 5 classes a partir do método Natural Breaks. As variáveis de Geologia, solos, orientação das vertentes, Geomorfologia, uso e ocupação foram reclassificadas conforme o número de classes que elas já possuem. Em relação às variáveis contínuas, para o uso no RFE e RF/RFE, AHP/RF, não foram reclassificadas, sendo colocadas em ambos métodos como variável contínua, sendo as mesmas normalizadas, para um valor comum.

## **10 Mapeamento e tratamento (limpeza), normalização e separação das amostras**

Nesse trabalho, as amostras consistem no mapeamento das áreas que contém um processo erosivo laminar visível (área de erosão), bem como as áreas onde esse processo não está ocorrendo (área de não erosão).

Tais amostras foram mapeadas através do *software* Google Earth Pro, a partir das imagens MAXAR/GOOGLE. Nesse mapeamento foi utilizado, além das imagens mais atuais, imagens mais antigas, as quais auxiliaram na observação da evolução temporal dos processos erosivos. Foi visto que, em muitos casos, devido a sazonalidade, em diferentes épocas do ano, os processos erosivos podem estar de diferentes formas e, em tempos de maior umidade, as pequenas manchas de solo exposto podem até mesmo desaparecer.

Após o mapeamento dos processos erosivos, os mesmos foram convertidos do formato de origem *Keyhole Markup Language* (KML) para o formato Shapefile, visando a manipulação desses dados nos demais *softwares* de Geoprocessamento.

Com os dados em formato Shapefile, no *software* QGIS os mesmos foram analisados, testados e tratados. Assim, com o uso de imagem de satélite, foi feita a análise do dado, sendo percebida a existência de manchas de erosão muito pequenas. Com isso, muitas feições vetoriais de erosão ao serem convertidas para raster não contemplaram nenhum pixel. Essas foram excluídas, para não gerar ruídos desnecessários nos dados. Além disso, as erosões que destoavam do restante em função de seu grande tamanho foram retiradas, pois observou-se a partir de testes que estas contribuem para um comprometimento do resultado final e, conseqüentemente, no modelo.

Após o tratamento inicial, as amostras foram reclassificadas, onde os locais com erosão ganharam valor 2 e os locais de não erosão, valor 1, tendo assim um arquivo binário. Após essa reclassificação, os polígonos foram transformados em pontos através da ferramenta “centróides”, a qual marca um ponto no centróide (ou centro geométrico) do polígono. Tanto para o RFE quanto para o Random Forest, as amostras foram divididas entre treino (70%) e teste (30%).

## **11 Tratamento e exclusão das variáveis através do método RFE**

Com as variáveis e os processos erosivos já devidamente processados, foi possível aplicar os métodos de seleção de variáveis. Assim, utilizou-se o *Recursive Feature Elimination* (RFE), que é um algoritmo capaz de selecionar somente as variáveis relevantes para um determinado modelo preditivo, encontrando a melhor combinação de variáveis, a partir do processo de seleção reversa. Para tanto, o algoritmo constrói um modelo usando todas as variáveis, neste caso através do algoritmo Random Forest e, em seguida faz o cálculo de cada uma dessas variáveis no modelo gerado e, tendo esse cálculo é feita a exclusão de variáveis menos importantes a partir do cálculo de índices como precisão global e Kappa (Bulut, 2021).

Para aplicação desse método, é necessário determinar alguns parâmetros, como as informações acerca do número de vezes na elas se cruzam (fold) e também o número de repetições que é feita desse procedimento (repeat). Por padrão se utiliza 10 fold e 5 repeats. Vários testes foram realizados e, considerando os resultados obtidos, bem como a exigência computacional requerida quando se aumenta o número de folds e repeats, no presente estudo foram utilizados o valor padrão, visto a menor exigência computacional, economia de tempo, bem como pelo fato do resultado não ter alterações significativas com o aumento de folds e repeats.

## 12 Exclusão e pesos das variáveis a partir da percepção humana (exclusão manual)

Para o método AHP/SP e RF/MANUAL as variáveis foram selecionadas a partir da percepção humana. Devido ao fato de que o ser humano possui dificuldades para colocar os pesos caso se tenha um grande número de variáveis, no presente trabalho foi definido o número de 05 variáveis para serem selecionadas, o que também corrobora com Saaty (2014), que dá variados exemplos de aplicação do método AHP com 05 variáveis. No entanto ressalta-se que, apesar desses exemplos, Saaty não definiu um número ideal, ou seja, não há uma regra única para a quantidade ideal de variáveis para serem utilizadas no AHP.

Após essa definição foi criado um questionário via Google Forms (<https://forms.gle/CjnrCyfVti41uzjV7>) para que os decisores colocassem os pesos nas 05 variáveis que os mesmos julgavam mais importantes para a erosão dos solos. Assim, foram selecionadas as variáveis nas quais o ser humano determinou serem as melhores.

Em relação ao peso de cada variável, no seu uso relacionado às análises multicritérios AHP e SP, é visto que muitas pesquisas utilizam bibliografia para determinar os pesos. No entanto, considerando que a literatura científica aborda essa questão considerando outras literaturas e/ ou considerando uma experiência particular de um determinado autor em uma área específica, com características fisiográficas que podem ser completamente diferentes das características da BHRX, na presente pesquisa, será, além da bibliografia, considerada a realidade de campo que, como mostrado no trabalho de Lacerda et al. (2021), é eficaz para análise de susceptibilidade à erosão, bem como a experiência prática dos autores do presente trabalho.

Assim, os pesos para SP foram contabilizados entre o valor 1 a 9. Já no AHP, tais pesos passarão pelo processo do método AHP, transformando os pesos em escala numérica para pesos AHP, conforme mostrado por Saaty (2014). Ainda, é importante considerar que, para aplicação dos pesos, existem as variáveis intraclasses e extraclasses. As intraclasses são as informações presentes em uma única variável, como por exemplo, a variável de uso da terra possui as classes de pastagem, fragmentos florestais, dentre outros. Já os pesos extraclasses, esses são elencados na comparação entre as diferentes variáveis, como por exemplo, a comparação entre a variáveis de solos e uso e ocupação, TWI, declividade, dentre outras. Assim, os pesos foram colocados conforme as figuras no seguinte link: <[https://drive.google.com/drive/folders/1iuiAW7w2BGuVvRSPIa8yjTzUC4YGBbRW?usp=share\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1iuiAW7w2BGuVvRSPIa8yjTzUC4YGBbRW?usp=share_link)>.

### 13 Aplicação dos métodos de Análise Multicritério (SP - AHP)

Para as análises por meio do método AHP e Sobreposição Ponderada, os arquivos em formato Raster foram reclassificados, sendo que os valores das camadas serão alterados de acordo com os pesos estabelecidos, para em seguida serem utilizados nas ferramentas para análise AHP, e Sobreposição Ponderada. Vale ressaltar que para o método Sobreposição Ponderada os valores serão reclassificados no intervalo de 1 a 9 e para o AHP serão conforme os pesos AHP.

Para a análise por meio do método AHP, foi utilizado o site AHP Priority Calculator, no seguinte caminho <https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php> e posteriormente processado através da calculadora raster, disponível no *software* QGIS, a qual aplica, a partir da determinação dos pesos das variáveis, a comparação de todos os critérios, retornando como resultado um arquivo Raster com as áreas mais susceptíveis à erosão.

Para a análise a partir da sobreposição ponderada, os arquivos Raster reclassificados foram inseridos na ferramenta *Weighted Overlay*, a qual fará a multiplicação dos valores das células dos arquivos de entrada pelo peso de importância dos mesmos.

### 14 Aplicação dos métodos Machine Learning: RF/RFE - AHP RF - RF MANUAL

Para aplicação do *Machine Learning* através do algoritmo *Random Forest* será utilizado o pacote *RandomForest* presente no *software* R, o qual permite ser feita a regressão e classificação baseado em Breiman (2001). No presente trabalho o algoritmo foi usado como regressão, com a variável dependente sendo colocadas como valores numéricos. Após testes, seguindo lógica semelhante à descrita acima para utilização do RFE, foram utilizadas 600 árvores de decisão; já para o *mtry* foi considerado a raiz quadrado do número de variáveis utilizadas, tendo assim valor arredondado para 3.

### 15 Validação e análise dos modelos

Para verificação estatística, a partir do mapeamento das amostras será utilizada a *Receiver Operating Characteristic* (ROC) (Swets, 1996), expressa pela relação dos valores da *True Positive Rate* (TPR) e do *False Positive Rate* (FPR) para a probabilidade de ocorrência das erosões nas classes de predição. A avaliação da curva ROC é simplificada com o cálculo da *área under the curve* (AUC), que apresenta a capacidade do modelo prever a ocorrência

de eventos predefinidos (Naghibi et al. 2014). De acordo com a avaliação da precisão do valor AUC, Yesilnacar (2005) definiu que a predição é: ruim entre 50 a 60%; regular entre 60 a 70%; boa entre 70 a 80%; muito boa entre 80 a 90%; excelente entre 90 a 100%. Ressalta-se que, para utilização da curva ROC os modelos gerados foram reclassificados, pois esse método exige um arquivo de dados categóricos.

## 16 RESULTADOS

A partir das metodologias, foi possível mapear, inicialmente, 8.170 amostras, sendo estas compostas por áreas de erosão, bem como áreas de não erosão, que somam 5.460 e 2.710, respectivamente. No entanto, após as amostras tratadas, tal valor mudou para 3.889, sendo 1.796 amostras correspondentes a áreas de erosão e 2.093 a áreas de não erosão. Após inserção no R, foram vistos dois valores NA, que foram removidos. Devido à bacia ter mais áreas de não erosão em comparação com áreas de erosão, o número de amostras também foi maior para as áreas de não erosão. A espacialização das amostras pode ser observada na Figura 10.

**Figura 10 - Espacialização das amostras**



Fonte: Os autores

Além da importância das amostras nas análises e validações, a observação e análise das mesmas pode ajudar na identificação de objetos, pois um padrão é referente ao arranjo dos

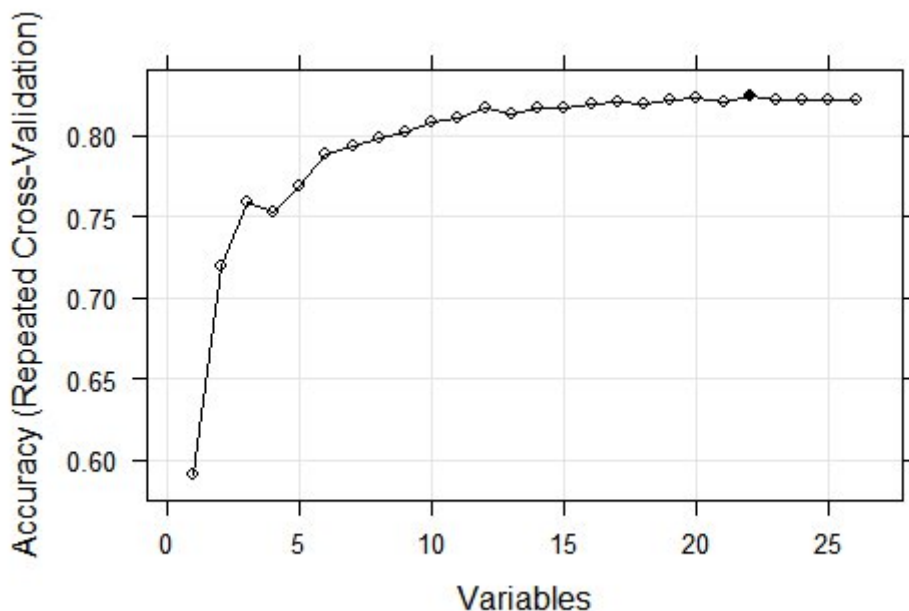
objetos/alvos na superfície, Florenzano (2011). Assim, é possível observar a partir do mapeamento das amostras um padrão na espacialização das erosões, as características da área (física, biótica e socioeconômica) as quais se concentram, de maneira geral, na parte mais central da bacia. Também, é visto em observações em imagens de satélite, bem como em trabalho de campo, que próximo às áreas urbanas são vistos muitos processos erosivos gerados pelo ser humano de forma direta, como grandes cortes para construção civil.

### 17 Variáveis consideradas pelo método RFE

A partir dos procedimentos metodológicos aplicados foi possível gerar modelos que representam cada variável previamente considerada. Assim, foram gerados 26 modelos das variáveis, os quais a partir da reamostragem passaram a possuir um pixel de aproximadamente 30 metros, para que os mesmos possam ser comparados no *software* R.

A partir da análise RFE foi possível observar as variáveis que mais influenciam no modelo de susceptibilidade à erosão, bem como o número ideal de variáveis a ser utilizado, como visto na Figura 11:

**Figura 11 - Acurácia das variáveis segundo o método RFE**



Fonte: Os autores

A figura acima mostra que o modelo que obteve maior acurácia, segundo a Acurácia Global, foi o gerado com o uso de 22 variáveis. No entanto, a curva do gráfico mostra que a partir de um certo número de variáveis o valor não aumenta de forma significativa, como é

possível ver a partir da variável 09, onde após a mesma não há um grande aumento na acurácia, o que pode ser melhor visto na tabela abaixo.

Tabela 3 - Performance das variáveis no RFE

<b>Variables</b>	<b>Accuracy</b>	<b>Kappa</b>
1	0.5912	0.1803
2	0.7190	0.5126
3	0.7587	0.28883
4	0.7521	0.4995
5	0.7689	0.5339
6	0.7886	0.5733
7	0.7931	0.5825
8	0.7985	0.5934
9	0.8019	0.6007
10	0.8085	0.6139
11	0.8101	0.6174
12	0.8165	0.6304
13	0.8136	0.6246
14	0.8169	0.6311
15	0.8163	0.6300
16	0.8192	0.6357
17	0.8202	0.6378
18	0.8197	0.6368
19	0.8221	0.6418
20	0.8223	0.6422
21	0.8204	0.6385
22	0.8237	0.6450
23	0.8212	0.6398
24	0.8219	0.6413
25	0.8218	0.6412
26	0.8211	0.6396

Fonte: O autor

Como também é possível observar na tabela acima, o melhor cenário para modelar os dados são com 22 variáveis, onde se encontram os melhores valores de Acurácia Global. No entanto, observa-se que, após a variável 09 os valores, tanto da Acurácia quanto do Kappa, não se alteram significativamente. Assim, aceita-se perder esses pequenos valores de acurácia para que se tenha menos variáveis no modelo e o mesmo seja mais simples de ser explicado (mesmo que 09 variáveis ainda não seja um número tão pequeno).

Portanto, as variáveis consideradas, foram: Altitude, Orientação das vertentes, Declividade, Slope Length, Distância das estradas rurais, Pluviosidade, TWI, Uso da terra e Solos.

## **18 Variáveis consideradas pelo método manual**

A partir das considerações feitas pelos decisores e a soma dos pontos elencados em cada variável, as que obtiveram melhor pontuação foi o uso da terra (43 pts), declividade (31 pts), Solos (29 pts) e formas geomorfológicas, orientação das vertentes e pluviosidade empatadas com 13 pts.

Devido ao fato de que na metodologia proposta iriam ser escolhidas apenas cinco variáveis, foi necessário retirar uma das variáveis empatadas com 13 pontos. Apesar da importância da precipitação para a erosão, tal variável foi escolhida para ser retirada, visto que sua escala é muito generalizada se comparada às outras variáveis. Assim, a partir dos critérios descritos, as variáveis selecionadas foram: uso da terra, declividade, solos, formas e orientação das vertentes.

Após teste inicial foi visto que, devido a generalização da escala, o dado de solo fez com que o modelo final não obtivesse um resultado satisfatório, o que pode ser visto no Anexo A. Assim, sabendo da importância da variável altitude, bem como do fato que essa variável possui escala adequada, a mesma foi colocada no modelo (decisão do autor do presente trabalho).

## **19 Discussões**

### **19.1 Variáveis antrópicas**

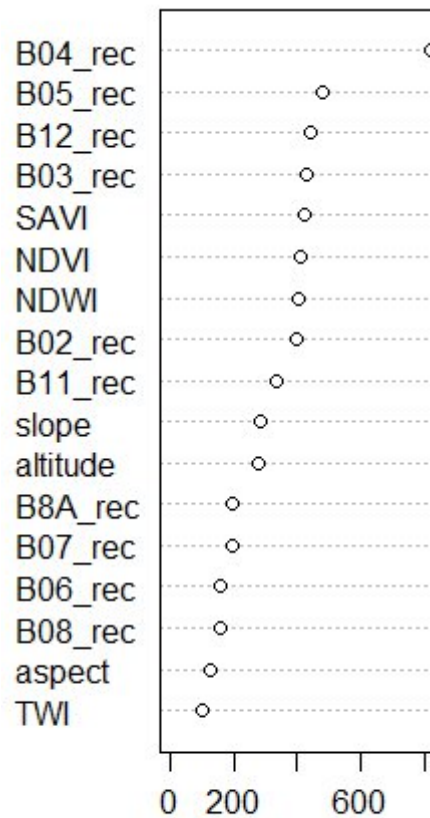
Todas as variáveis consideradas no presente trabalho possuem influência do ser humano, as aqui chamadas de “variáveis antrópicas” são aquelas nas quais o ser humano é o seu principal agente de transformação, sendo que, das variáveis selecionadas no presente trabalho, o Uso e ocupação das terras e as estradas rurais são variáveis nas quais a influência humana se expressa de forma muito nítida nos resultados gerados.

As metodologias utilizadas proporcionaram a classificação do uso da terra com uma acurácia global satisfatória. Assim, constata-se que as classes de interesse estão bem representadas nesse modelo. No entanto, cruzando os dados do modelo de uso da terra com os dados do IBGE, foi visto que o modelo subestimou a quantidade de agricultura em alguns municípios, devido, provavelmente, a maior parte das lavouras estarem localizadas no município de Ervália, que é um local de maior altitude, o que também pode estar relacionado com o fato da maior parte das amostras de agricultura terem sido extraídas neste local. Junto a isso, o fato da maior parte da agricultura dos municípios da BHRX serem de base familiar

(Censo Agro, 2017), favorece locais agricultáveis menores, o que, considerando a resolução de 20m da imagem, bem como a filtragem dos pixels após a classificação, esses pequenos locais de agricultura familiar podem ter sido generalizados.

Em relação às variáveis utilizadas, as que mais tiveram influência nessa modelagem de uso da terra foram as bandas 04,05,12,03 do satélite Sentinel-2, bem como os índices de vegetação SAVI, NDVI, NDWI, como visto na Figura abaixo.







**Figura 12** - Importância das variáveis no modelo de uso da terra



Fonte: Os autores

A partir da interação das variáveis mostradas acima, foi possível gerar o modelo de uso e ocupação das terras, sendo possível visualizar e quantificar algumas formas de usos da terra que influenciam diretamente na susceptibilidade à erosão dos solos na BHRX, sendo elas a classe de Pastagem, Fragmentos florestais, agricultura, Área construída, solo exposto e massa d'água, como visto na Figura 13.

**Figura 13** - Classes de uso da terra classificadas

Classe	Imagem de satélite
Fragmento florestal	
Agricultura	
Pastagem	
Solo exposto	
Área construída	
Água	

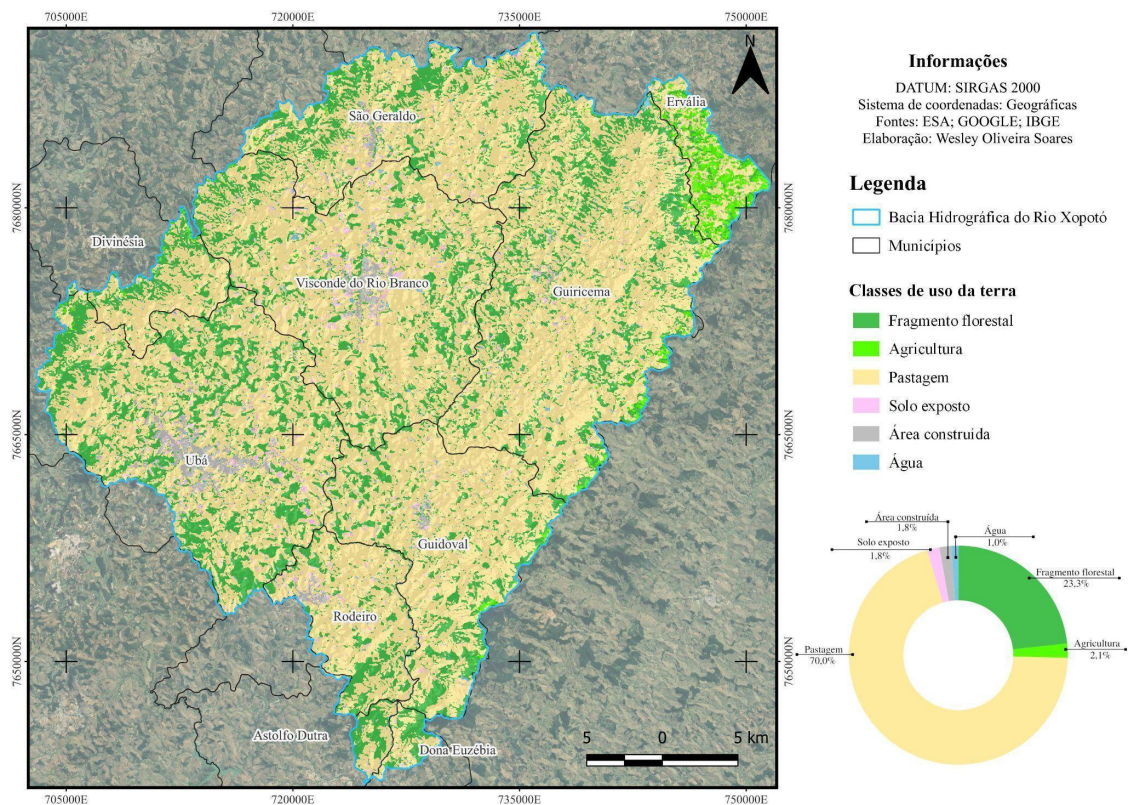
Fonte: Maxar/Google

A classe de fragmento florestal é composta por área de floresta “nativa” em sua maioria, bem como por floresta plantada, essa representada pelo plantio de eucalipto. A área de agricultura, em sua maioria, representada no modelo, é composta pela cultura do café. Ainda que na bacia tenha outras culturas, essas são menos presentes, pois são plantios menores no contexto da agricultura familiar. As áreas de pastagens consideradas no presente estudo são compostas tanto por pastagens mais degradadas e secas, bem como por áreas mais úmidas, como por exemplo, próxima de cursos d’água. Já os solos expostos são áreas desprovidas de qualquer vegetação, a área construída são áreas com predominância de construções, arruamentos, dentre outros e a classe de água é composta por massas d’água presentes na bacia.

A pastagem é predominante na bacia, ocupando um percentual de 70,0%, seguida dos fragmentos florestais com 23,3% e com outras classes um pouco menos expressivas

quantitativamente, como agricultura (mais densa) com 2,1%, Área construída e solo exposto com 1,8% e área pequenas massas de água, como tanques, por exemplo, totalizando 1,0% da bacia, como observado na Figura 14.

**Figura 14 - Uso e ocupação da BHRX**



Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível observar, as pastagens estão presentes na bacia de forma homogênea. A pastagem é um tipo de vegetação usada frequentemente para algumas atividades antrópicas, como, por exemplo, a pecuária. Dentro da BHRX se destaca alguns municípios que fazem muito uso da pecuária, como Guiricema, que possui 73% de seus estabelecimentos agrícolas voltados à pecuária, sendo seguido do município de Ubá com 64%; Divinésia com 62,9%; Visconde do Rio Branco com 61,5%; Rodeiro com 59,34% e Coimbra com 53,7%, sendo os demais com taxas abaixo de 50% (Censo Agro, IBGE, 2017).

A partir da grande área de pastagem existente na BHRX, considerando a presença da pecuária nos municípios da BHRX e que, na região, sua prática é feita no ambiente de pastagens, pode-se inferir que tal atividade possui muita influência no equilíbrio sistêmico da bacia, pois o pisoteio do gado exerce pressão sobre o solo, o que contribui com sua

compactação, sobretudo na época de chuvas e, na seca, para a desagregação das partículas, o que causa efeitos negativos nas propriedades do solo, contribuindo para degradação dos solos e também da vegetação e, conseqüentemente, propiciando áreas mais susceptíveis à erosão (Freitas et al., 2016; Parente; Maia, 2011; Fiorese et al., 2019).

Em relação a agricultura voltada às lavouras permanentes, é visto que, dentre os municípios pertencentes na BHRX, Ervália se destaca, tendo aproximadamente 82% de seus estabelecimentos agropecuários voltados para lavouras permanentes, sobretudo o Café. O segundo maior produtor de lavoura permanente na área de estudo é o município de Guidoal, porém com apenas 21% dos estabelecimentos agropecuários voltados para as lavouras permanentes. Já as lavouras temporárias são mais presentes no município de Visconde do Rio Branco com 25%; São Geraldo com 23,7%; e os demais municípios com menos de 16%.

A mudança do uso da terra de floresta para agricultura traz conseqüências para as propriedades químicas e físicas do solo (Vanacker et al., 2019). Em estudo realizado na China, país com condições fisiográficas muito diferentes do Brasil, Han et al. (2020) avaliaram a capacidade de resposta do uso de terras agrícolas sob influência de chuvas fortes em áreas montanhosas e constataram que as terras agrícolas sofreram maior erosão se comparadas com campos florestais. Os autores também destacaram que o fluxo de água concentrado foi o maior causador dos processos erosivos e sugeriram que em terras agrícolas é necessário o aumento da cobertura vegetal para a proteção em casos de chuvas fortes.

Na zona da mata mineira, mesorregião na qual a BHRX está inserida, histórico do uso e ocupação é marcado pela derrubada de grandes áreas de mata atlântica, que foram substituídas pelo manejo agrícola feito de forma inadequada, onde, nesse local, há a prevalência de atividades como a pecuária e o plantio de culturas como cana e café, atividades essas que contribuíram e ainda contribuem para o avanço de áreas erodidas, bem como para a erodibilidade dos solos.

Na BHRX há a existência de várias pequenas propriedades voltadas à agricultura familiar, com o plantio variado de frutas e hortaliças para comércio local. No entanto, no modelo de uso da terra destaca-se a quantidade de áreas voltadas para a agricultura no município de Ervália. Nesse local, das áreas destinadas a agricultura voltada a lavouras permanentes, a cultura do café se destaca, mais precisamente, a produção do café arábica, o qual tem uma quantidade de produção de 7.800 toneladas em 2017; 12.150 em 2018; 6.014 em 2019; 9.331 em 2020; 5.410 2021, em uma área colhida de aproximadamente 5.000 ha (IBGE, 2017).

Ainda em relação a agricultura, Castro e Neto (2009) fizeram um estudo comparativo relacionando as culturas do café e da soja associadas à erosão dos solos no Brasil e percebeu,

analisando vasta bibliografia que, se comparado a soja, o café tende a causar menos erosão hídrica, pois é uma cultura permanente, a qual por não haver a necessidade de replantio em toda safra e nem a rotação de culturas, causa menor interferência no solos. Além disso, é observado pelos autores que, em grande parte, os locais nos quais a cultura do café é mais desenvolvida no Brasil são em áreas de mares de morros, que possuem topografia montanhosa, o que favorece a prática de uma agricultura manual, em detrimento da mecanização, a qual é fortemente praticada em áreas mais planas, características de locais com plantações de soja no Brasil.

Portanto, sabe-se que o tipo de cultura estabelecida no local influencia no manejo. No entanto, Castro e Neto (2009) também ressaltam que o modo no qual tal manejo é realizado é um fator muito importante na existência e intensidade dos processos erosivos, pois em muitos casos as práticas adotadas para o manejo do solo não são de caráter conservacionista, o que é bem registrado no histórico brasileiro de desmate das áreas de floresta nativa e degradação do meio ambiente.

Além dos malefícios ambientais, a erosão dos solos afeta, sobretudo aos pequenos agricultores, onde grande parte dessas pessoas vivem abaixo da linha da pobreza e suas rendas, usada em grande parte para subsistência, é comprometida devido aos solos afetados, que propiciam menor produtividade, diminuindo assim a rentabilidade (Hurni, et al., 2008).

Assim, considerando que os municípios da BHRX são compostos por maior parte de pequenos produtores de agricultura familiar, infere-se que os mesmos podem ser muito prejudicados com a erosão dos solos e, ainda se for considerada a renda de tais municípios, pode perceber que o poder aquisitivo dos produtores não é tão grande, fazendo com que os mesmos dependam muito da produtividade dos solos para gerar uma renda satisfatória.

Ainda em relação ao uso e ocupação das terras, é visto, que as mudanças provocadas pelo ser humano são capazes de alterar a dinâmica do ciclo da água em bacias hidrográficas (Soares et al., 2019), sendo que, a capacidade de infiltração da água no solo pode ser influenciada pelo modo com o qual é feito o uso e ocupação das terras (Santos, 2018).

Assim, considerando as classes de uso da terra presentes na BHRX, pode-se observar que, nas áreas construídas, devido a impermeabilização do solo, existe grande volume do escoamento superficial das águas das chuvas, sobretudo chuvas intensas, as quais, em muitos casos, possuem uma velocidade grande, comprometendo e servindo para aumentar locais de solo exposto próximos a áreas construídas, pois a água com maior velocidade, em contato com o solo exposto, possui um poder de arraste grande, contribuindo para a desagregação e arraste das partículas do solo, o que favorece o aparecimento e/ou de manchas de erosão nesses pontos, próximos de áreas urbanas.

Outro agravante da interferência antrópica é que, em muitos casos, são abertos cortes para construção civil e, muitas vezes, esses cortes, que são grandes áreas de solo exposto, ficam abertos, sem construção, por tempos prolongados, o que favorece o avanço da erosão nesses pontos, como mostrado na Figura 15.

**Figura 15** - Evolução temporal dos cortes



Fonte: Elaborado pelo autor

Acima, é possível visualizar que, no ano de 07/2019, a área em destaque está coberta quase totalmente pela pastagem. Ainda em 2019, porém no mês 09, já é aberto uma área, ficando o solo exposto, sendo que, em 09/2020, já se tem uma grande corte, promovendo uma vasta área de solo exposto, se formando uma área de franca erosão dos solos. Ressalta-se que ao observar imagem recente, do ano de 2022 e também em verificação de campo, constata-se que essa área está até o presente momento aberta, fazendo com que ocorra a erosão acelerada no local de forma contínua, contribuindo para o avanço desses processos erosivos, os quais, começam como uma erosão laminar e, se dadas as devidas condições, evoluem para erosões lineares, como ravinas e posteriormente, voçorocas.

Nesse sentido, é visto que, muitas áreas de corte são feitas e, até que o empreendimento consiga de fato ser construído, muitas vezes se passam anos, pois tal construção depende de

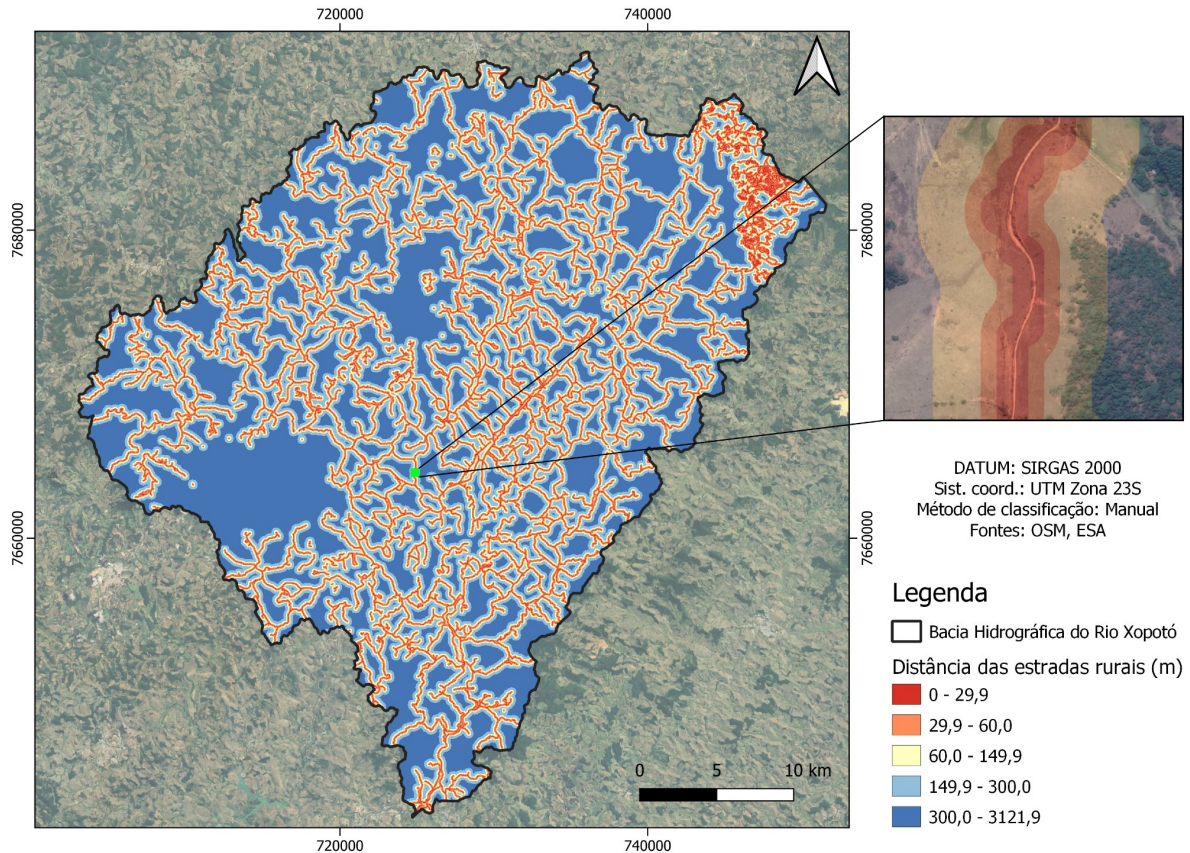
várias questões, como a disponibilidade financeira do empreendedor no momento; questões envolvendo a especulação imobiliária, onde muitas vezes é feito o corte para o terreno ser vendido a um preço melhor; legislação e licenças, dentre outros.

Ao contrário das áreas de solo exposto, as áreas providas com uma vegetação mais desenvolvida, como os fragmentos florestais presentes na área de estudo, são locais mais protegidos contra o impacto direto da água da chuva, o que impede a desestruturação do agregado, bem como a geração de crostas no solo (Rocha et al., 2016). Também, em áreas de mata, a infiltração de água no solo é maior, visto que a cobertura florestal age como uma barreira física para diminuir a força da água das chuvas, bem como a presença de raízes dá maior sustentação ao solo e age como canais que escorre a água para camadas mais profundas do solo (Grabowski, 2013).

Outra influência antrópica que contribui no avanço dos processos erosivos são as estradas rurais. Nesses locais, a desagregação e transporte do solo para partes mais baixas são causadas pela concentração do volume da água na estrada (Casarin, 2008) que, geralmente, possuem solos mais compactados, sobretudo, devido ao tráfego de veículos e/ou animais. Assim, a estrada rural intercepta e canaliza a água da chuva que não se infiltrou, portanto que está escoando superficialmente no solo e, assim, há essa concentração do fluxo da água, o que aumenta o potencial de erosão.

Na BHRX, a partir do mapeamento das principais estradas existentes na área, foi vista a existência de 1.909 km de estradas. Com elas mapeadas, foi possível gerar o dado de “distância das estradas”, como mostrado na Figura 16.

**Figura 16 - Estradas rurais**



Fonte - Os autores

Com base na figura acima é possível afirmar que há uma concentração de estradas rurais na parte nordeste da bacia, onde fica o município de Ervália, o que ocorre justamente por causa da característica de uso e cobertura da terra nesse local, pois sendo essas áreas um local com predominância da atividade agrícola, sobretudo vinculada ao cultivo do café, que exige estradas em seu interior.

Dentre as adversidades que atinge as estradas rurais, a erosão dos solos possui maior poder de destruição, podendo atrapalhar o trânsito de veículos e afetando o meio ambiente, pois causa, além da erosão laminar, ravinas e voçorocas (Figura 17), o que propicia vários efeitos nocivos como assoreamento de rios e lagos (Santos et al., 2019).

**Figura 17-** Representação das estradas rurais



Fonte: Santos et al. (2019).

Como visto na Figura acima a erosão pode interromper a passagem de veículos em uma estrada rural. Assim, a correta manutenção destas estradas para o trânsito de veículos é fundamental, pois muitas vezes é o único meio de acesso das populações residentes na zona rural à cidade. É visto que muitos produtores usam tais estradas para se deslocarem e comercializarem os seus produtos, os quais são a fonte de renda de subsistência para muitas famílias que moram nas zonas rurais. Além dos produtores rurais, a população residente em áreas urbanas também ficam prejudicadas, pois a produção gerada no campo é que abastece as cidades.

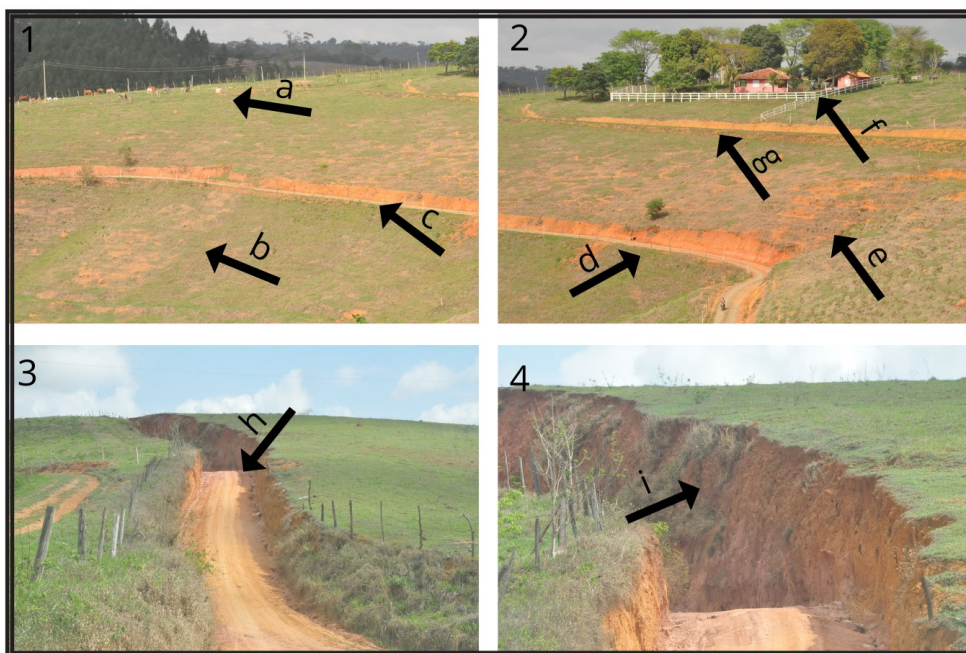
Considerando a importância das estradas rurais, é visto que, para que as mesmas tenham o dano ao ambiente minimizado é preciso que a erosão seja combatida através de sistemas de drenagem eficientes, os quais objetivam fazer com que haja a retirada da água do local, não deixando que ela escoe ou que seu acúmulo faça poças na estrada (Santos et al., 2019).

Considerando que a agricultura é uma atividade fundamental para a subsistência dos moradores de zonas rurais, é visto que as estradas rurais influenciam nessa prática de várias maneiras e, além das questões relacionadas ao transporte, as estradas podem causar a erosão dos solos. Sabendo que a erosão pode causar consequências como a danificação do solo devido a perda de nutrientes, o que piora a qualidade desse solo para o plantio, podendo causar até mesmo a desertificação, locais que possuem estradas rurais em meio às plantações, como por exemplo essas estradas rurais existentes em áreas de agriculturas do município de Ervália, se não mantidas da maneira correta podem afetar a produtividade nas plantações de café existentes

neste município.

Além dessas estradas em meio a áreas agricultáveis, na BHRX, em trabalho de campo, foi observada a presença de estradas rurais nas encostas. As estradas nesse contexto atuam como um corredor para a água, fazendo com que os locais ao entorno dessas fiquem mais susceptíveis a erosão o que se agrava ainda mais nessas estradas nas áreas de encostas que possuem topografia mais declivosa, por conta do efeito da gravidade, como mostrada na Figura 18.

**Figura 18-** Erosões próximas à estradas rurais



Fonte: Os autores

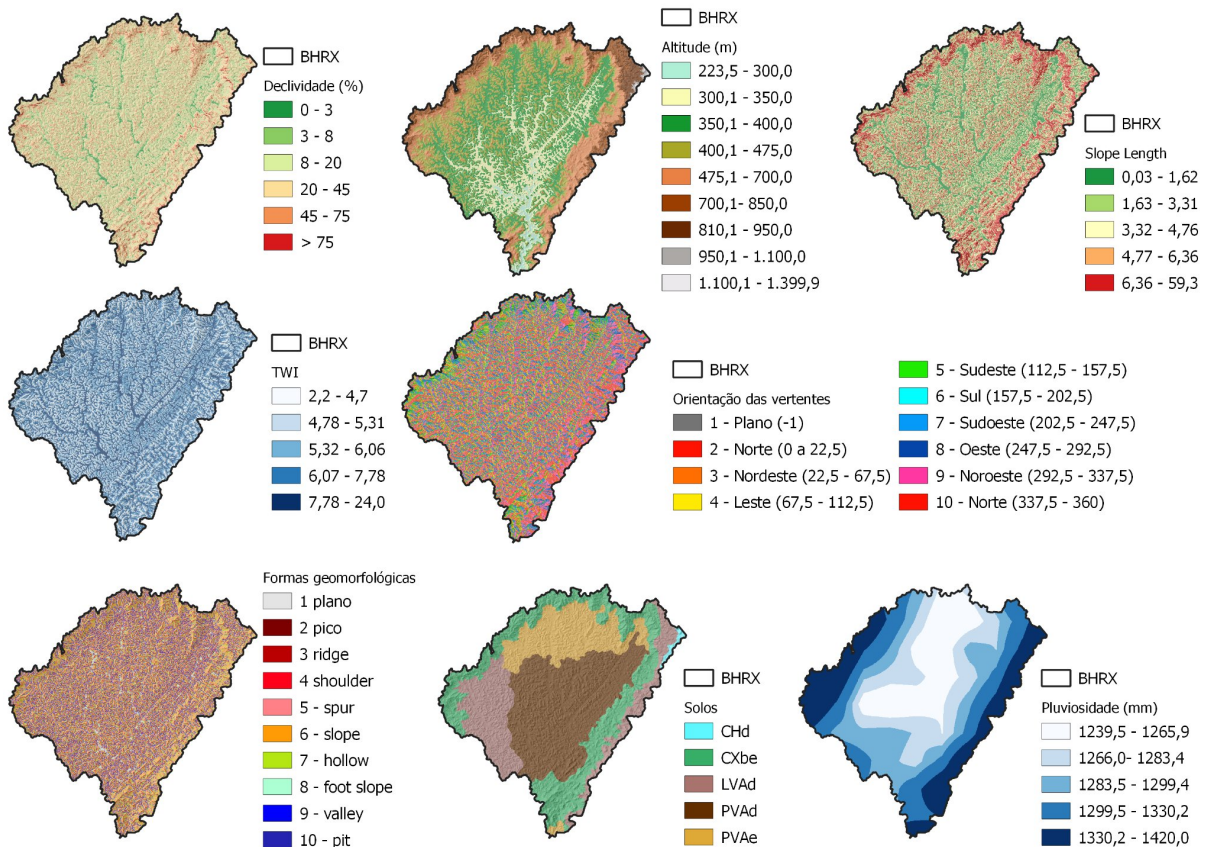
Na figura acima é possível observar, no elemento “a”, a presença de atividade pecuária em área de pastagem e, logo abaixo, em área mais declivosa a presença de processos erosivos (“b” e “e”), justamente em local próximo a estradas rurais e também ocupação humana (“c”, “d”, “f” e “g”). Nesse contexto, a presença de gado irá contribuir para uma maior compactação do solo, e em épocas de seca, para desagregação das partículas do solo. Este fato soma-se a influência das estradas rurais presentes uma acima da outra em área declivosa, as quais propiciam uma maior desagregação e transporte dos solos de forma mais intensa, pois na estrada há a canalização da água proveniente do escoamento superficial, que é maior devido a estrada ser composta por solo exposto, provocando uma grande concentração da água nesse local causando a erosão vista nos itens “e” e “b”.

Ainda em relação a Figura 17, é visto no item “h” a presença de estrada rural feita em uma área de grande corte em meio a um morro, provocando a existência de uma “parede” de solo exposto “i”, a qual além de uma área muito susceptível a erosão se torna uma área de risco, pois envolve a presença do ser humano, o qual pode estar transitando com veículos e uma parte desta área de corte se desprender e atingir alguma pessoa. Além do risco ao ser humano, há a questão do impedimento do trânsito nesse local, pois em épocas de chuva esse local irá se tornar inviável para o tráfego, devido ao barro gerado pela chuva, o que é grande por causa da qualidade de sedimento existentes nesse local e também pelo impedimento físico devido a existência de uma voçoroca ou de um volume de solo proveniente da eventual queda do barranco.

## 20 Variáveis fisiográficas

As variáveis fisiográficas consideradas no presente trabalho são: Declividade, Altitude, Slope Length, Topographic Wetness Index, Orientação das Vertentes, Geomorfologia, Solos, Pluviosidade, as quais são representadas por meio dos modelos abaixo (Figura 19).

**Figura 19-** Modelos utilizados para gerar a susceptibilidade à erosão



Fonte: Os autores

Na BHRX a altitude possui uma maior variação nas bordas na bacia, em áreas que variam de altitude de 475 m a 700 m, nestes locais a litologia tem forte influência, bem como a declividade. Na parte mais abaixo, nas altitudes que variam entre 223 m e 400 m, predominam as feições de mares de morros, com morros em formato de meia laranja, com a presença de vales tanto em formato U quanto em V (áreas mais próximas das bordas da bacia).

Além dos aspectos inerentes a ela, a altitude influencia diretamente nas características de outras variáveis, como altitude, temperatura, declividade, uso da terra, dentre outras. Assim, é uma variável fundamental para análise, o que foi confirmado pelo método RFE. Além dessa influência nas características de outras variáveis, a altitude influencia diretamente na perda de solos, onde, as gotas de chuvas que entram em contato com o solo “possuem energia potencial proporcional ao produto de sua massa e altitude acima do nível do mar do seu ponto de queda e tende a transformá-la em energia cinética” (Palmeira, 2004).

Uma variável fundamental para a determinação das áreas mais suscetíveis a erosão é a orientação das vertentes, pois tem impacto direto na quantidade de radiação solar recebida. Assim, a partir do entendimento de que a radiação solar é muito influenciada pela topografia (Nettesheim et al., 2015), é possível afirmar que, em altas latitudes, as vertentes orientadas em direção a Linha do Equador recebem maior quantidade de radiação em comparação às vertentes opostas. Em estudo feito na Bacia Hidrográfica do Rio dos Bagres, sub-bacia da BHRX, Lacerda et al. (2021), observaram que as vertentes voltadas para o norte, as quais sofrem alta incidência de radiação solar foi a face que mais sofreu com a erosão dos solos.

Devido ao fato da “capacidade de transporte e a velocidade de deslocamento de material nas vertentes são diretamente proporcionais a sua inclinação” (Florenzano, 2008), a declividade é uma das variáveis mais importantes para o estudo das erosões, sendo que, em áreas mais íngremes, as quais existem maior escoamento superficial, contribuem para a erosão dos solos (Vitte e Mello, 2007).

Utilizando da declividade como um de seus variáveis de análise, juntamente do fator de inclinação, o fator Slope Length mostra o efeito que o comprimento e inclinação do declive possui sobre o relevo Michigan University (2022), onde quanto maior o comprimento do declive (ou encosta, nesse caso), ou seja, maiores valores fator SL, maior a velocidade no fluxo superficial da água, o que influencia no arraste dos sedimentos, acarretando maior probabilidade à erosão, como explicado nos trabalhos de Gayen, et al. (2019).

Diferentemente das variáveis do relevo citadas acima, o Topographic Wetness Index (TWI) mostra a umidade do solo, onde locais mais propensos ao acúmulo de água possuem valores de TWI mais elevados.

Em relação a pluviosidade, como visto acima, os extremos da bacia, que são áreas de maior altitude, possuem uma maior taxa de pluviosidade, enquanto a parte central, essa com menor altitude possuem taxas menores. Assim, na medida em que se avança para a área central da bacia, a taxa de precipitação vai diminuindo. Esse resultado corrobora com o que foi encontrado por Silva et al. (2019), os quais, ao analisarem a variação espacial de precipitação em uma bacia hidrográfica, perceberam que o total de precipitação aumenta das partes mais baixas do relevo até as mais altas, tendo a altitude como principal fator para a variação espacial de precipitação no local analisado.

Na BHRX, os locais com maior taxa de precipitação são áreas que possuem majoritariamente os fragmentos florestais como principal uso da terra, o que contribui para que, mesmo em alto volume de chuva e alta declividade, nessas áreas não tenha grande presença de processos erosivos, pois, as áreas de floresta, ao possibilitar maior infiltração da água, dificulta o aparecimento das erosões.

Apesar das áreas centrais da bacia possuírem um volume de precipitação menor se comparado às áreas de maior altitude, ainda assim é um volume considerável, principalmente quando se considera que nessas áreas mais baixas, a pastagem é o principal uso da terra. Nesse local a precipitação pode ser um fator importante para a existência desses processos erosivos pois, existem áreas de pastagem em áreas declivosas, propício do relevo mares de morros, o que com o impacto de gotas da chuva ocorre o efeito splash, possibilitando o surgimento de novos processos erosivos.

Ainda em relação a precipitação, é visto que as áreas de solo exposto, ou de pastagem mais incipiente, favorecem a erodibilidade do solo, tendo em conta que, de acordo com Florenzano (2008), a principal causa da erosão hídrica é a ação da chuva sobre o solo, sendo o fluxo de água difuso o causador da erosão laminar.

Em relação a Geomorfologia, é visto que a área de estudo se localiza na Zona da Mata Mineira, na Unidade Geomorfológica da “Depressão do Rio Xopotó” (FARIA, 2007). Na “Depressão do Rio Xopotó” os vales são encaixados e as formas são típicas do domínio de “mares de morros” (AB’SABER, 2003). As sub-bacias encontradas da região Tendências e Desafios abrange sete municípios, sendo eles: São Geraldo, Guiricema, Visconde do Rio Branco, Guidoal, Ubá, Divinésia e Rodeiro.

A partir do uso da ferramenta R.Geomorphon, a qual utiliza a classificação proposta por Jasiewicz e Stepinski (2013) foi visto que na BHRX existem 10 formas geomorfológicas. Além das formas geomorfológicas, de acordo com a classificação do IBGE foram vistas as principais unidades geomorfológicas abrangidas pela BHRX, sendo elas os Patamares do Alto Rio Doce, Depressão do Rio Pomba e Muriaé, Serranias da Zona da Mata Mineira.

Em relação às unidades geomorfológicas observa-se que no Planalto dos Campos das Vertentes (ou patamares do alto rio Doce) há predominância dos modelados em morros associados ou não a morrotes, com entalhe vertical médio a fraco. Nas áreas de depressões, a dissecação vertical em geral é mais branda e os declives são menos acentuados com uma maior profusão de relevos colinosos e de morros com encostas mais suavizadas.

Já a Depressão Escalonada dos Rios Pomba – Muriaé representam a porção mais rebaixada e de morfologia mais suave é caracterizada por relevo colinoso, com vertentes convexas e topos convexizados ou tabulares, dissecada pela bacia do Alto Rio Pomba. Como mostrado por Raposo e Salgado (2010), a topografia suave da porção rebaixada que corresponde à Depressão do Rio Pomba apontam a existência, nas proximidades do interflúvio que divide as bacias dos rios Doce e Paraíba do Sul, de morros residuais originalmente pertencentes ao planalto, drenado pela bacia do Rio Doce, e atualmente pertencentes à bacia do Rio Pomba.

Em relação às formas geomorfológicas é visto que as formas de Depressão e Vale estão presentes em áreas de planícies fluviais, correspondendo, de forma geral às áreas de leito vazante, leito menor e leito maior na BHRX, conforme a classificação de Tricart (1966). Na planície fluvial há a acumulação de material proveniente da erosão dos solos ao longo da bacia, os quais são transportados e depositados nesses locais (Leite, 2013). Em observação de campo e por imagem de satélite foram visualizadas poucas manchas de erosão nessas áreas.

Assim como a geomorfologia e demais variáveis do relevo, os solos é um item que possui muita influência na erosão, pois a principal causa da erosão hídrica é a ação da chuva sobre o solo (Palmeira, 2005). Na BHRX, de acordo com o dado usado, em escala 1:650.000, predomina-se cinco classes de solos, sendo elas os Cambissolos Húmicos Distróficos (CHd), Cambissolos Háplicos Eutróficos (CXbe), Latossolos Vermelhos Amarelos Distróficos (LVAd), Latossolos Vermelhos Amarelos Eutróficos (LV Ae), Argissolos Vermelhos Amarelos Eutróficos (PVAe) e Argissolos Vermelhos Amarelos Eutróficos (PVAe).

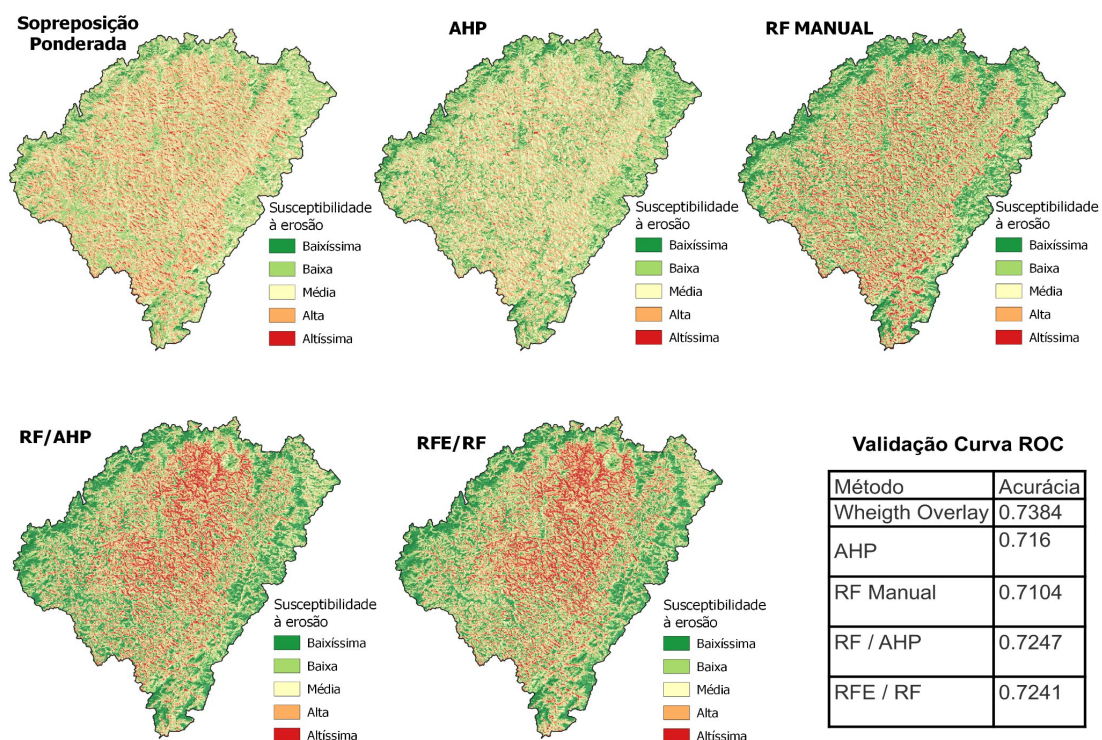
Os Cambissolos Húmicos Distróficos é um tipo de solo com maior taxa de matéria orgânica, a qual contribui para que se tenha a infiltração de água maior em relação ao escoamento superficial, contribuindo na estabilidade da estrutura, sendo esse cambissolo com uma susceptibilidade a erosão menor se comparado ao Cambissolos Háplicos Eutróficos, o qual

tem um menor horizonte B, com uma estrutura mais fraca, ocorrendo em área com maiores declividades, tendo assim uma maior erodibilidade, principalmente em áreas de solo exposto. Em relação às áreas de latossolos, é visto que os mesmos estarão, na BHRX, localizados em áreas de topos de morro e apresentam os agregados mais estáveis, portanto sendo, de forma natural solos mais estáveis e maior resistência à erosão. Em relação aos Argissolos, o distrófico possui um pouco mais de importância na erosão, pois ele provavelmente irá apresentar menores condições para que a vegetação se desenvolva, se comparado ao Argissolo eutrófico.

## 21 Modelos de susceptibilidade à erosão e validação

Com a aplicação de toda metodologia mostrada foi possível gerar modelos de susceptibilidade a erosão a partir dos métodos propostos. Apesar dos modelos gerados, é preciso ter um método estatístico que os valide e aponte o mais adequado para BHRX considerando os parâmetros utilizados. Assim, com a aplicação da curva ROC, foi visto que o modelo com maior acurácia para a susceptibilidade a erosão na BHRX foi o Random Forest. Os modelos com suas respectivas validações podem ser vistos na Figura 20.

**Figura 20-** Modelos de susceptibilidade à erosão na BHRX



Fonte: Os autores

De acordo com os resultados obtidos através da validação com uso da curva AUC, foi visto que o modelo gerado a partir do método de sobreposição ponderada, que é o método mais simples aqui utilizado, obteve melhor acurácia. É visto que variados trabalhos destacam o RF como um método muito eficiente para gerar modelos de erosão dos solos, como o trabalho de Ghost e Maiti (2021), onde RF obteve maior acurácia em comparação a Regressão Logística e Decision Tree. Assim o resultado aqui encontrado pode estar relacionado com algum procedimento metodológico, com as características dos dados de entrada nos métodos ou pelas características da BHRX.

Como pode ser observado na figura acima os modelos gerados possuem diferenças, tendo cada um deles características particulares. É possível notar que, os modelos feitos a partir do Machine Learning com uso do RFE são menos homogêneos, ou seja, possuem áreas específicas indicando muitas áreas de erosão “altíssima”, nas quais estão majoritariamente ao centro e ao norte da bacia. Em contraponto, os modelos hierárquicos e RF/Manual fornecerem resultados mais homogêneos, ou seja, não há locais específicos com muitas áreas com altíssima susceptibilidade, sendo essas áreas espalhadas de forma homogênea por toda a bacia, de acordo com as áreas mais propícias para tanto de acordo com as variáveis e pesos elencados, ou seja, se áreas voltada a norte com alta declividade e com pastagem, são áreas com alta susceptibilidade para toda bacia de forma homogênea não tendo nenhuma área específica. Tal fato pode ocorrer visto que os métodos RFE/RF e AHP/RF possuem diferentes número de variáveis em relação aos outros métodos, as que podem estar influenciando para tal resultado.

O método AHP subestimou as áreas com altíssima suscetibilidade à erosão, tendo, em locais onde todos os métodos colocam como altíssimo, a classe predominante foi “alta”. Analisando áreas potenciais para instalação de barraginhas, Souza et al. (2021) observaram que, ao contrário do presente estudo, o AHP maximizou as áreas potenciais. Ainda de acordo com os autores supracitados, o AHP contribuiu para o ajuste do modelo do Random Forest, fato esse que não ocorreu no presente trabalho.

## **22 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A forma com a qual é feito o mapeamento das amostras pode alterar significativamente o resultado, tanto do RFE quanto do RF.

A falta de dados em escala adequada pode enviesar o modelo, bem como influenciar na acurácia dos resultados.

Apesar de serem variáveis importantes para análise da erosão, os dados de solos e precipitação aqui considerados não possuem escala adequada para análise na BHRX. Assim, em futuros trabalhos, os que usem metodologias semelhantes a aqui apresentada podem ter melhores resultados caso tenham melhores dados de entrada.

A experiência do autor, bem como a forma na qual os dados são adquiridos, tratados e inseridos nos algoritmos/análises hierárquicas possuem muita influência no resultado final. Assim, apesar do uso da inteligência artificial, o conhecimento do pesquisador ainda é algo fundamental em análises como a do presente estudo.

Devido ao fato da ferramenta Weighted Overlay disponível no software ArcGis 10.5 somente permitir a entrada de dados categóricos, para a comparação entre os métodos, os dados também foram entrados dessa forma nos algoritmos RFE/RF. Para futuros trabalhos considerar a possibilidade de entrar com os dados na forma contínua, quando a natureza dos mesmos permitir.

Considerando a disponibilidade de dados, bem como os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa, o método mais simples, que é a SP obteve maior índice de acurácia.

O modelo gerado através do AHP usado como variável no modelo RFE/RF não melhorou o modelo de forma significativa.

As áreas de maior declividade, com vertentes voltadas para o norte e nordeste e com uso de pastagem ou solo exposto são locais que, em todos os modelos apresentaram alta ou altíssima susceptibilidade à erosão.

Apesar de importantes para entender o ambiente, bem como auxiliar no direcionamento de políticas públicas, os modelos não substituem ou minimizam a importância de trabalhos de campo.

## REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J.T.S.Z.; DOBROWSKI, S.A.; PARKS, K.C. **Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015**. 2018. Disponível em: < <http://www.climatologylab.org/terraclimate.html> >. Acesso em: 11 nov. 2020.
- AB'SÁBER, A.N. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. 2ª ed. São Paulo, Ateliê Editorial, 2003.
- AGRA, R; ANDRADE, C. **Análise Multicritério da Suscetibilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio da Batateira, CE**. vol. 73, n. 1, Rev. Bras. Cartogr, 2021, 133p. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/50066/31021>.
- AGUILAR, C; HERRERO, J; POLO, M. J. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale. **Hydrology and Earth System Sciences**. p. 2479–2494. 2010. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/14/2479/2010/hess-14-2479-2010.pdf>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMIDI, A; AMIDI, S. **Dicas de aprendizado não supervisionado**. Stanford University. 2018. Disponível em: [https://stanford.edu/~shervine/l/pt/teaching/cs-229/dicas-aprend\\_izado-nao-supervisionado](https://stanford.edu/~shervine/l/pt/teaching/cs-229/dicas-aprend_izado-nao-supervisionado).
- AQUINO et al. Uso de modelos de séries temporais para predição da erosividade mensal, para o município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, n. 2, p.205-210, ag. 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/26075103\\_Uso\\_de\\_modelos\\_de\\_series\\_temporais\\_para\\_predicao\\_da\\_erosividade\\_mensal\\_para\\_o\\_municipio\\_de\\_Lavras\\_MG](https://www.researchgate.net/publication/26075103_Uso_de_modelos_de_series_temporais_para_predicao_da_erosividade_mensal_para_o_municipio_de_Lavras_MG).
- ARABAMERI, A.; PRADHAN, B.; REZAEI, K.; CONOSCENTI, C. Gully erosion susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. **Journal of Environmental Management**. February, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/332950921\\_Gully\\_erosion\\_susceptibility\\_mapping\\_using\\_GIS-based\\_multi-criteria\\_decision\\_analysis\\_techniques](https://www.researchgate.net/publication/332950921_Gully_erosion_susceptibility_mapping_using_GIS-based_multi-criteria_decision_analysis_techniques)
- BAPTISTA, G. M. M. Sensoriamento Remoto Hiperespectral. 2ª ed. Editora Interciência, 2019.
- BARATTO, J. et. al. Metodologia Para a Estimação da Temperatura Do Ar em Função da Altitude a Partir de Dados de Perfil Topoclimático. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 30, p. 114-132. Dourados, MS. Jan. / Jun. 2022. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14789/8509>.

BARBOSA, R. Decisões Complexas - Introdução aos métodos quali-quantitativos. **Brmídia**, 1ª edição. 192 p. 2013 Disponível em: [https://www.amazon.com.br/Decis%C3%B5es-Complexas-Introdu%C3%A7%C3%A3o-m%C3%A9todos-quali-quantitativos-ebook/dp/B00B7RF9UG/ref=sr\\_1\\_27?\\_\\_mk\\_pt\\_BR=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&criid=2E7D4X9YIR8HN&keywords=ahp&qid=1652905478&s=digital-text&sprefix=ahp%2Cdigital-text%2C193&sr=1-27&a\\_sin=B00B7RF9\\_U\\_G&revisionId=57b8972f&format=1&depth=1](https://www.amazon.com.br/Decis%C3%B5es-Complexas-Introdu%C3%A7%C3%A3o-m%C3%A9todos-quali-quantitativos-ebook/dp/B00B7RF9UG/ref=sr_1_27?__mk_pt_BR=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&criid=2E7D4X9YIR8HN&keywords=ahp&qid=1652905478&s=digital-text&sprefix=ahp%2Cdigital-text%2C193&sr=1-27&a_sin=B00B7RF9_U_G&revisionId=57b8972f&format=1&depth=1)

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 2 Ed. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.

BERTRAND, Georges. Paisagem e Geografia física global. Curitiba, n. 8, p. 141-152, 2004. Editora: UFPR. Tradução: Olga Cruz.

BEVEN, K. J; KIRBI, M, J. 1979 . A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologique**. v.24. p. 43-69. 17. ag. 1978. Disponível em: [https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0262\\_6667909491834?cookieSet=1](https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0262_6667909491834?cookieSet=1).

BIAU, Gérard. Analysis of a random forests model. *The Journal of Machine Learning Research*, v. 13, n. 1, p. 1063-1095, 2012.

BIGARELLA, J. J. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 28. m. 2012. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm).

BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning** v.45, n. 3, p. 5-32, 2001.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. Principles of geographical information systems. Oxford, Oxford University Press, 1998.

BURROUGH, P.A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford, Clarendon Press, 1986. 193 p.

CALDAS, V. I. S. P., DA SILVA, A. S., & DOS SANTOS, J. P. C. Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos–São João, no Estado do Rio de Janeiro–Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 04, p. 1415-1430, 2019.

CÂMARA, G.; Freitas, U. Perspectivas em sistemas de informação geográfica. Fator GIS, v. 3, n. 10, p. 31-34, 1995.

CARLEO, G. et. al. Machine learning and the physical sciences. **Reviews of Modern Physics**. v. 91. p. 39. 6. Dez. 2019. Disponível em: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.91.045002#fulltext>.

CARMO, A. M.; S.; M. V. S.; DUARTE, C. R.; LOPES, P. S.; SABADIA, J. A. B. Avaliação de susceptibilidade de risco à erosão, utilizando as variáveis morfométricas, para as serras da porção sul do maciço central do Ceará. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 9, 2016.

Casarin, R. D. **Controle de Erosão em Estradas Rurais não Pavimentadas, Utilizando Sistema de Terraceamento com Gradiente Associado a Bacias de Captação**. Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luiz de Oliveira .2008. Dissertação (mestrado)- Agronomia: Área de Concentração em Irrigação e Drenagem. Botucatu -Sp. Ag. 2008. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/93814/casarin\\_rd\\_me\\_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/93814/casarin_rd_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

CASTRO, S. S; NETO, J. P.Q. Soil Erosion in Brazil from Coffee to the Present-day Soy Bean Production. **Elsevier**. v.13. p.195-221. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928202508100116>.

CDC – CENTER FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. Países. 2011.

CHENCI, G. P.; RIGNEL, D. G.; LUCAS, C. A. Uma introdução a lógica Fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**, v. 1, n. 1, 2011

CHEROBIN, S. F. **Estimativa de Erosão e Sua Relação Com os Diferentes Mecanismos Erosivos Atuantes: Estudo da Voçoroca Vila Alegre**. 2012. Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite. Dissertação (mestrado)- Engenharia Ambiental. Área de Concentração: Meio Ambiente. Ouro Preto. 2012. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2967/1/DISSERTA%20C%203%87%20C3%83%20EstimativaEros%20C3%A3oRela%20C3%A7%C3%A3o.PDF>.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de Sistemas Ambientais. 1ª ed. São Paulo, Editora Blucher, 1999

CODEMIG - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Mapeamento geológico de Minas Gerais**. 2014. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>>. Acesso em: 22 out. de 2020

CONTI, J. B. **Geografia e paisagem**. Ciência e Natureza, v. 36, n. 3, p. 239-245, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/13218>

COSTA, J. C. et. al. Validação Dos Dados De Precipitação Estimados Pelo Chirps Para O Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 24. p. 228-243. Jan/Jun 2019. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/339395933\\_VALIDACAO\\_DOS\\_DADOS\\_DE\\_PRICIPITACAO\\_ESTIMADOS\\_PELO\\_CHIRPS\\_PARA\\_O\\_BRASIL](https://www.researchgate.net/publication/339395933_VALIDACAO_DOS_DADOS_DE_PRICIPITACAO_ESTIMADOS_PELO_CHIRPS_PARA_O_BRASIL).

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. D.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos, INPE, 2001.

CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T. **Geomorfologia do Brasil**. 3ª ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2003.

DCLG. **Multi-criteria analysis: a manual**. Department for Communities and Local Government: London. January ,2009. London, 166 p. Disponível em: [http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria\\_Analysis.pdf](http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf).

DECHEN, S. C. F.et. al. **Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo**. *Bragantia*, Campinas, v. 74, n. 2, p.224-233, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/nCjy5nDxcp4tDGwhx6CbjHp/?format=pdf&lang=pt>

DORNELLAS, P. C.; VINICIUS, S. S.; XAVIER, R. A.; SILVA, R. M. Vulnerabilidade à erosão dos solos na bacia do alto rio paraíba, semiárido paraibano. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Fortaleza, Ceará, 2019. IBSN: 978-85-7282-778-2. Disponível Acesso em: 26 out. 2020.

DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos, INPE, 2001.

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. MSI/SENTINEL-2. 2020. Disponível em: <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>. Acesso em: 25 de out. de 2020

FAO; ITPS. **Status of the World's Soil Resources: Main Report**. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy. p.608. 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1034770>.

FARIA, A. L. L.; SILVA, J. X.; GOES, M. H. B. Análise ambiental por geoprocessamento em áreas com susceptibilidade à erosão do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG). **Caminhos de Geografia**, v. 4, n. 9, 2003.

FARINASSO, M. et. al. **Determinação do Fator Topográfico da Equação da Usle por Meio de Geoprocessamento - Bacia do Rio Gurguéia**. V Simpósio Nacional de Geomorfologia I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia. p.12. Rio Grande do Sul. 2004. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/5/5/Miguel%20Farinasso.pdf>.

- FIGLIANO, C. H. U. et al. Levantamento do Potencial Natural de Erosão dos Solos das Áreas de Pastagem e Cafeicultura do Município de Muniz Freire, Estado do Espírito Santo. **Cadernos Camilliani**. v.16, n.3, 2019. Disponível em: [https://www.saocamiloes.br/revista/index.php/cadernoscamilliani/arti\\_cle/view/418/255](https://www.saocamiloes.br/revista/index.php/cadernoscamilliani/arti_cle/view/418/255).
- FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. Oficina de Textos. 1ª ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2008.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ª Edição, 2011
- FRANCISCO, C. E. S. et al. **Análise Multicriterial na Seleção de Bacia Hidrográfica para Recuperação Ambiental**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 1-13, jan.-mar., 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/DPBqvcKHRgdZFMwBMMpH7Tx/?format=pdf&lang=pt>.
- FRANKLIN, Benjamin. [Correspondência]. Destinatário: Joseph Priestley. Londres, 19 set. 1772. 1 carta. Disponível em: <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-19-02-0200>.
- FREITAS, G. A. de. et al. Diagnóstico ambiental de áreas de pastagens degradadas no município de Gurupi-TO. *Biota Amazônia*, Macapá, v. 6, n. 1, p.10-15, 2016.
- FRITZSONS et al. (2016). Relação Entre Altitude e Temperatura: Uma Contribuição ao Zoneamento Climático no Estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**. Vol. 18 –JAN/JUN 201. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/13870/7163>
- GAYEN, A.; POURGHASEMI, H. R.; SAHA, S.; KEESSTRA, S.; BAI, S. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. **Science of the total environment**, v. 668, p. 124-138, 2019.
- GIS FOR ALL. TWI en SAGA-GIS (Índice topográfico de Humedad). Youtube, 8. fev. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=AqHqbkp1pU4>.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. *SBA controle & Automação*, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994.
- GOOGLE; MAXAR TECHNOLOGIES. Recorte da Bacia Hidrográfica do Rio Xopotó, Minas Gerais. Imagem de satélite. Coordenadas Lat.
- GOVERS, G.; MERCKX, R.; WESEMAEL, BV.; OOST, KV. Conservação do solo no século 21: por que precisamos de intensificação agrícola inteligente. *Solo*, v. 3, n. 1, pág. 45-59, 2017.
- GRABOWSKI, L. Erosão do solo pela atividade agrícola. **Monografias Brasil Escola**. Disponível em: <https://monografias.brasilecola.uol.com.br/agricultura-pecuaria/erosao-solo-pela-atividade-agricola.htm>

GRILO, R. C.; ENAMI, L. Gestão de bacias hidrográficas com o uso de modelo preditivo de erosão dos solos e sistemas de informação geográfica. *UNAR*, Araras, SP, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2008.

GUERRA, A. J. T. et al. Erosão e Conservação de Solos no Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/273563806\\_Erosao\\_e\\_Conservacao\\_de\\_Solos\\_no\\_Brasil4](https://www.researchgate.net/publication/273563806_Erosao_e_Conservacao_de_Solos_no_Brasil4).

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. Oficina de Textos, v.1, p.192, 2013.

GUERRA, A.J. T. **A erosão dos solos no contexto social**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 17, p. 14-23, 1994. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/6147>

GUERRA, A.J. T. **Experimentos e Monitoramentos em Erosão dos Solos**. Revista do Departamento de Geografia, UFRJ. p. 32-37. 2005. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47282/51018>

GUTH, P, L; GEOFFROY, T, M. **LiDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins**. 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/tgis.12825>

Haidara, I.; Tahri, M., Maanan, M.; Hakdaoui, M. Efficiency of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to detect soil erosion vulnerability. *Geoderma*, v. 354, p. 113853, 2019.

HALEFOM, A.; TESHOME, A. Modelling and mapping of erosion potentiality watersheds using AHP and GIS technique: a case study of Alamata Watershed, South Tigray, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 5, n. 3, p. 819-831, 2019.

HAN, J. et. al. Agricultural land use and management weaken the soil erosion induced by extreme rainstorms. *Elsevier*. v. 301, 1. Out. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880920302322>.

HUANG, S. et al 2020. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Springer Link*. 24. jul. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-020-01155-1>.

Hurni, H. et al . Soil Erosion and Conservation in Global Agriculture. *Springer Link*. p.41 –71. 2008. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-6778-5\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-6778-5_4).

IBGE-**INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, Produção Agrícola Municipal 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/ervalia/pesquisa/15/11863?localidade1=311670&ano=2019>.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**. Indicadores Municipais. 2017. Disponível em: <https://mapasinterativos.ibge.gov.br/agrocompara/>

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Hidrografia de Minas Gerais**. 2012. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>.

Index of /products/CHIRPS 2.0/global\_annual/tifs. **Climate Hazards Center**. 2023. Disponível: [https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global\\_annual/tifs/](https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_annual/tifs/)

KLAUS, D; GOEPEL; BPMSG. AHP Priority Calculator. **Business Performance Management Singapore**. 26. fev. 2022. Disponível em: <https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php>.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. (Wall-map 150cmx200cm).

LACERDA, H. et. al. Estudo da Susceptibilidade à Erosão Laminar em Bacia Hidrográfica da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.14, n.03. p.1707-1723. 2021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/HeitorLacerda/publication/353509679\\_Estudo\\_da\\_Susceptibilidade\\_a\\_Erosao\\_Laminar\\_em\\_Bacia\\_Hidrografica\\_da\\_Zona\\_da\\_Mata\\_Minis\\_Gerais\\_Brasil/links/6126350c2979ad5d60175e43/Estudo-da-Susceptibilidade-a-Erosao-Laminar-em-Bacia-Hidrografica-da-Zona-da-Mata-Minas-Gerais-Brasil.pdf](https://www.researchgate.net/profile/HeitorLacerda/publication/353509679_Estudo_da_Susceptibilidade_a_Erosao_Laminar_em_Bacia_Hidrografica_da_Zona_da_Mata_Minis_Gerais_Brasil/links/6126350c2979ad5d60175e43/Estudo-da-Susceptibilidade-a-Erosao-Laminar-em-Bacia-Hidrografica-da-Zona-da-Mata-Minas-Gerais-Brasil.pdf).

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LEI, X.; CHEN, W.; AVAND, M.; JANIZADEH, S.; KARIMINEJAD, N.; SHAHABI, H.; MOSAVI, A. GIS-based machine learning algorithms for gully erosion susceptibility mapping in a semi-arid region of Iran. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, p. 2478, 2020.

LEITE, R . **Aspectos Geomorfológicos da Planície Fluvial do Baixo Rio Cotia, SP**. Orientadora: Profª Drª Déborah de Oliveira. 2013. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física. São Paulo. 2013. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-09122013094906/publico/2013\\_RobsonLeite\\_VCorr.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-09122013094906/publico/2013_RobsonLeite_VCorr.pdf).

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

LIMA, P. A. A paisagem da porção meridional do estado de Mato Grosso do Sul: intervenções antrópicas e transformações ambientais. In: SILVA, C. A. Geografia e Natureza: experiências e abordagens de pesquisas. Dourados: Ed. UFGD, 2012. 256 p.

LISBOA et. al. **Análise da vulnerabilidade ao processo erosivo das encostas: estudo de caso no Município de Itaporanga D’Ajuda (SE)**. *Ciência e Natura*, v. 42, ,2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/38783/html>.

LORENZETTI J.A. **Princípios Físicos De Sensoriamento Remoto**. 1ª ed. São Paulo, Blucher, 2009.

LOTTE, R.G. et.al. Aquisição do Índice de Saturação do Solo (TWI) para a avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa na região de São Sebastião-SP. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE**. In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. João Pessoa-PB, p. 7117-7124. 25/ 29. abr. 2015. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1570.pdf>

LS FACTOR. **RUSLE**. Michigan University. Disponível em: <http://www.iwr.msu.edu/rusle/lfactor.htm#:~:text=L%20is%20the%20slope%20length,same%20soil%20type%20and%20gradient>.

MACHADO, R. L. **Características Físicas de Chuvas e Erosividade no Estado do Rio de Janeiro e Erodibilidade de Argissolo Vermelho-Amarelo em Seropédica-RJ**. Tese (Doutor em Ciências)- Curso de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, fev. 2011. Disponível em: <https://tede.ufrj.br/jspui/bitstream/jspui/2670/4/2011%20-%20Roriz%20Luciano%20Machado.pdf>.

Machine Learning. **IBM Cloud Education**. 15 jul. 2020. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/cloud/learn/machine-learning>

MAFRA, R. C.; PINHEIRO, M. M. F.; CICERELLI, R. E.; PRADO, L. Validação de mapa de vulnerabilidade a erosão por aprendizagem de máquina. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 564-575, 2020.

MAIATO, A. G.T. **O papel da agricultura de conservação na luta contra a erosão do solo em particular em Angola**. Universidade de Évora, p 1-53,11. Nov. 2016. Disponível em: [https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/19167/1/Adelaide%20vers%C3%A3o%20FINAL%20final%20final2%20AdeMC\\_corrigeido.pdf](https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/19167/1/Adelaide%20vers%C3%A3o%20FINAL%20final%20final2%20AdeMC_corrigeido.pdf)

MALCZEWSKI, J. **GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature**. Vol. 20, No. 7, 2006, p 703–726. Editora: Taylor e Francis. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658810600661508>

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Análise multicritério de decisão em ciência da informação geográfica**. Nova York: Springer, 2015.

MARQUES, João Fernando. Custos da erosão do solo em razão dos seus efeitos internos e externos à área de produção agrícola. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 36, n. 1, p. 61-80, 2019.

- MATTIVI, P. et al. TWI Computation: A Comparison Of Different Open Source Giss. **Springer Open**. 12 p. 29. Jul. 2019. Disponível em: <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-019-0066-y>
- MOSAVI, A.; SAJEDI-HOSSEINI, F.; CHOUBIN, B.; TAROMIDEH, F.; RAHI, G.; DINEVA, A. A. Susceptibility Mapping of Soil Water Erosion Using Machine Learning Models. **Water**. v. 12, n. 7, p.1995, 2020.
- MOURA, A. C. M.; JANKOWSKI, P. L. Contribuições aos estudos de análises de incertezas como complementação às análises multicritérios-“Sensitivity Analysis to Suitability Evaluation”. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 4, 2014.
- MUSHI et al. Assessment of basin-scale soil erosion within the Congo River Basin: A review. **Catena**. p. 64-76. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816219300803>
- NAGA, I. E; MURPHY, J. M. What Is Machine Learning?. **Springer Link**. p 3-11. 2015. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18305-3\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18305-3_1)
- NAVES, F, E; ALMEIDA, R. T. S. Índice Topográfico De Umidade Como Método Para Identificação De Pontos De Alagamento Em Áreas Urbanas. **Sociedade e Território**. Natal. V. 33, N.1, p.209–227Jan./Abr. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/22836>.
- ODUNUGA, S.; AJIJOLA, A.; IGWETU, N.; ADEGUN, O. Land susceptibility to soil erosion in Orashi Catchment, Nnewi South, Anambra State, Nigeria. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 376, p. 87-95, 2018.
- OLIVEIRA, A. C.; BARBOSA V. M.; JACOVINE, L. A. G.; SANTOS, M.O.; JACON, A. D. Histórico e implementação de sistemas de Pagamentos Por Serviços Ambientais no Estado de Minas Gerais. **Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate**, v. 4, n. 1, 2013.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). FAO no Brasil. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/publicacoes/pt/>.
- PALMEIRA, A. F. **Técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicadas à Gestão do Território do Município de Paragominas (Estado do Pará)**. INPE. 2004. Orientadores: Drs. Edison Crepani e José Simeão de Medeiros. Dissertação (mestrado)-Sensoriamento Remoto. 3 fev. 2004. Disponível em: <http://mtcm16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2004/04.02.16.08/doc/publicacao.pdf>.
- PARENTE, H. N.; MAIA, M. O. Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos com ênfase no Semiárido. **Revista Trópica -Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 3, p. 3, 2011.
- PASSOS, B. T. 2021. Conhecendo os tipos de aprendizado de máquina: supervisionado e não supervisionado. **Ateliware**. Disponível em: <https://ateliware.com/blog/aprendizado-de->

[maquinatipos?gclid=CjwKCAjwhNWZBhB\\_EiwAPzlhNqRc9sJjgnpvkWwaix9anpEqP72yMoO1aA9OezN\\_VT6c5GeOyF7QeRoCzAoQAvD\\_BwE.](https://www.mdpi.com/2072-4292/12/15/2411/htm)

PÉREZ, J. Alguns comentários sobre o AHP de Saaty. **Management Science**, v. 41, n. 6, pág. 1091-1095, 1995.

PHAN, T, N; KUCH, V; LEHNERT, L, W. **Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier—The Role of Image Composition**. MDPI. 22 p. 27. jul.2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/15/2411/htm>.

PINTO, G. S.; SERVIDONI, E. L.; LENSE, G. H. E.; MOREIRA, R. S.; MINCATO, R. L. Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica utilizando o Método de Erosão Potencial. *Revista Do Departamento De Geografia*, v. 39, p. 62-71, 2020. POESEN, Jean. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 43, n. 1, p. 64-84, 2017.

POURGHASEMI, H. R.; SADHASIVAM, N.; KARIMINEJAD, N.; COLLINS, A. L. Gully erosion spatial modelling: Role of machine learning algorithms in selection of the best controlling factors and modelling process. **Geoscience Frontiers**, v. 11, n. 6, p. 2207-2219, 2020.

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. *Revista Georaguaia*, v. 8, n. 2, 2018.

RAHMATI, O.; HAGHIZADEH, A.; POURGHASEMI, H. R.; NOORMOHAMADI, F. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. **Natural Hazards**, v. 82, n. 2, p. 1231-1258, 2016.

RALPH, C. Dubayah. Modeling a Solar Radiation Topoclimatology for the Rio Grande River Basin. **Journal of Vegetation Science**. v.5. p. 627-640. 1994. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2307/3235879>.

REIS, L. L. Uso de equipamentos de precisão para elaboração de mapeamentos de risco: um estudo de caso do bairro Cachoeirinha, Viçosa MG. Monografia (Graduação em Geografia). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2019.

ROSS, J.L.S. Geomorfologia ambiente e planejamento. São Paulo, Contexto, 1996.

RUBIRA, F. G.; DE MELO, G. D. V.; DE OLIVEIRA, F. K. S. Proposta de padronização dos conceitos de erosão em ambientes úmidos de encosta. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 33, n. 1, 2016.

RUSSO, F. S. M; CAMANHO, R. R. Criteria in AHP: a systematic review of literature. **Procedia Computer Science**, v. 55, p. 1123-1132, 2015.

RUSSO, F.S.M.; CAMANHO, R. R. Criteria in AHP: a systematic review of literature. **Procedia Computer Science**, v. 55, p. 1123-1132, 2015.

SÁ JÚNIOR, A. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 101 p, 2009.

SAHA, S.; ROY, J.; ARABAMERI, A.; BLASCHKE, T.; TIEN BUI, D. Machine learning-based gully erosion susceptibility mapping: A case study of Eastern India. **Sensors**, v. 20, n. 5, p. 1313, 2020.

SAHOUR, H., GHOLAMI, V., VAZIFEDAN, M.; SAEEDI, S. Machine learning applications for water-induced soil erosion modeling and mapping. **Soil and Tillage Research**, v. 211, p. 105032, 2021.

SANTOS, A. R. Estradas Vicinais de Terra: Manual técnico para conservação e recuperação. ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 3 ed. 147.p. São Paulo. 2019. Disponível em: [http://www.arsgeologia.com.br/Manual%20Estradas%20Vicinais\\_PDF.pdf](http://www.arsgeologia.com.br/Manual%20Estradas%20Vicinais_PDF.pdf).

SANTOS, J. P., COTA, G. E. M., LIMOIRO, B. F., PEDRAS, K. C., da COSTA, A. M., & VIANA, J. H. M. Susceptibilidade à erosão no Rio Gualaxo do Norte-MG. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2017.

SCHIER, Raul Alfredo. Trajetórias do conceito de paisagem na geografia. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 7, 2003.

SCHMIDT, A. M. A.. **Processo de apoio à tomada de decisão abordagens: AHP e Macbeth**. 1995.

SILVA, R. L. L. et. al. Variação Geográfica da Precipitação Pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, Rs. **Disciplinarum Scientia**. Série: Naturais e Tecnológicas. Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 41-51, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/3000/2350#>

Slope Length and Steepness factor (LS-factor). **ESDAC**. 2022. Disponível em: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/slope-length-and-steepness-factor-ls-factor>

SPADONI, G.L. et. al. Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography. **Elsevier**. v.20, nov. 2020. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938520302858?casa\\_token=Mr8elsaLBe8AAAAA:X9DavV6OpW8m\\_kpSa8ihXl3u5zeZLfCymeOQ33fljgFO3Fe7ZVWv6PDsguvptA-r28yZ9u78gI](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938520302858?casa_token=Mr8elsaLBe8AAAAA:X9DavV6OpW8m_kpSa8ihXl3u5zeZLfCymeOQ33fljgFO3Fe7ZVWv6PDsguvptA-r28yZ9u78gI).

SUN, W., SHAO, Q., LIU, J., ZHAI, J., 2014. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. **Catena**. 121, 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.009>

SWARNKAR, S.; MALINI, A.; TRIPATHI, S.; SINHA, R. Assessment of uncertainties in soil erosion and sediment yield estimates at ungauged basins: an application to the Garra River basin, India. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 4, p. 2471-2485, 2018.

SWETS, J. A. Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: Collected papers. **Psychology Press**, 2014.

TEHRANY, M. S.et. al. Soil erosion susceptibility mapping for current and 2100 climate conditions using evidential belief function and frequency ratio. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**. v. 8. 20.p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/320290901\\_Soil\\_erosion\\_susceptibility\\_mapping\\_for\\_current\\_and\\_2100\\_climate\\_conditions\\_using\\_evidential\\_belief\\_function\\_and\\_frequency\\_ratio#pf14](https://www.researchgate.net/publication/320290901_Soil_erosion_susceptibility_mapping_for_current_and_2100_climate_conditions_using_evidential_belief_function_and_frequency_ratio#pf14).

TERRA CLIMATE. **Climatology Lab**. 1958-2021. Disponível em: [https://climate.northwestknowledge.net/TE\\_RRACLIMATE/index\\_directDownloads.php](https://climate.northwestknowledge.net/TE_RRACLIMATE/index_directDownloads.php)

TORRES, F. T. P.; PIRES, L. V.; Júnior, S. A.; OLIVEIRA, N. A., DE OLIVEIRA Barros, K.; Machado, C. R.; SILVA, E. A susceptibilidade à erosão como subsídio ao planejamento urbano: estudo de caso do município de Ubá-MG. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2011.

UFV; CETEC; UFLA; FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>. Acesso em: 27 out. de 2011.

Understanding Euclidean distance analysis. **ESRI**. 4. fev. 2016. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>

VANACKER et. al. **Land use impacts on soil erosion and rejuvenation in Southern Brazil**. *Catena*.v.178, p. 256-266, July 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816219301110>

VITTE. A. C; MELLO, J. P.. Considerações Sobre a Erodibilidade dos Solos e a Erosividade das Chuvas e Suas Conseqüências na Morfogênese das Vertentes: Um Balanço Bibliográfico. **Climatologia e Estudos da Paisagem**. v. 2 n. 2. Rio Claro. 2007. p. 107. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/climatologia/article/view/775>.

YESILNACAR, E. K. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey: University of Melbourne. 2005

## ANEXO

**Anexo A-** Resultado do modelo AHP com a utilização da variável de solos

