



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E
DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

RENATA CRISTINA MAFRA

**DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS À RECUPERAÇÃO FLORESTAL EM
BACIA HIDROGRÁFICA A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Presidente Prudente - SP
2020



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E
DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

RENATA CRISTINA MAFRA

**DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS À RECUPERAÇÃO FLORESTAL EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Dissertação de mestrado apresentado à Pró-reitora de Pesquisa e Pós-Graduação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional (MMADRE).
Área de Concentração: Ciências Ambientais.

Linha II: Planejamento ambiental e Desenvolvimento Regional

Orientadora: Dr^a. Ana Paula Marques Ramos

Coorientadores:
Dr. Lucas Prado Osco
Dr. Marcelo Rodrigo Alves

634.956
M187

Mafra, Renata Cristina.

Definição de áreas prioritárias à recuperação florestal em bacias hidrográficas a partir de análise multicritério / Renata Cristina Mafra – Presidente Prudente, 2020.

53f.: il.

Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, SP, 2020.

Bibliografia.

Orientador: Ana Paula Marques Ramos

1. Inferência geográfica. 2. Análise multicritério. 3. Impacto ambiental. 4. Recuperação florestal. 5. Áreas prioritárias.
I. Título.

RENATA CRISTINA MAFRA

**DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS À RECUPERAÇÃO FLORESTAL
EM BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Dissertação de mestrado apresentado à
Pró-reitora de Pesquisa e Pós-Graduação
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Meio Ambiente e
Desenvolvimento Regional (MMADRE).
Área de Concentração: Ciências
Ambientais.

Linha II: Planejamento ambiental e
Desenvolvimento Regional

Presidente Prudente, 06 de março de
2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^a. Ana Paula Marques Ramos
Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE
Presidente Prudente – SP

Prof. Dr. Paulo Antônio Silva
Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE
Presidente Prudente – SP

Prof. Dr^a. Érika A. S. Moryia
Universidade Estadual Paulista – UNESP
Presidente Prudente – SP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os cientistas do Brasil que contribuem para o avanço do conhecimento e à melhoria da qualidade de vida de toda a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Não existe nenhum trabalho que possa vir a ser construído sozinho, o resultado de nossos esforços se une as inúmeras pessoas que compartilham, acreditam e apoiam nossos sonhos.

Agradeço primeiramente e principalmente a Deus que sempre esteve comigo me dando força a cada manhã.

Agradeço a minha mãe Cristina por ser minha inspiração em nunca desistir dos meus sonhos e ao meu pai Mafra por estar presente em meu coração todos os dias.

Agradeço a minhas irmãs Fernanda e Juliana por me darem a honra de ser tia de 6 figuras que me inspiram em ser uma pessoa melhor.

Agradeço a minha orientadora Dra. Ana Paula, que além de ter me orientado com maestria, me mostrou a melhor maneira de percorrer um caminho científico com seriedade e dedicação.

Agradeço meu coorientador Lucas Prado por quem muitas vezes me inspirei. Exemplo de cientista e determinação. Sem ele esse trabalho não existiria. Muito obrigada!

Agradeço meu coorientador Marcelo por sempre ter sido tão solícito. Agradeço por todo o ensinamento desde a graduação, sempre simples e tão querido com seus alunos.

Agradeço a Letícia e ao Bruno, que tanto me incentivaram a entrar no mestrado e sempre foram minha inspiração como pessoas e profissionais. Amo vocês!

Agradeço a Fernanda Carneiro e Geisiane Batista pela amizade, cumplicidade, pelos colos, ombros e abraços de apoio principalmente no final dessa jornada. Pelos dias bons e ruins, fizeram meu fardo se tornar mais leve. Me ensinaram ainda mais sobre amizade!

Agradeço a Mariana Mazuchelli por todas as conversas intensas sobre a vida pessoal e carreira profissional, principalmente nessa reta final do mestrado. Nossas conversas estarão sempre guardadas em meu coração.

Agradeço a Gisele Tonholi pela amizade desde meus primeiros dias da graduação. Enfrentamos altos e baixos juntas. Obrigada por tudo!

Agradeço a Mayara Faita pelo auxílio na minha pesquisa, por ter se tornado minha amiga, confidente, e também, por tanto ter me aconselhado sobre a vida profissional.

Agradeço ao Gustavo Lisboa por toda a parceria, me ajudando e me dando seu ombro várias vezes em que o desespero tomou conta de mim. Eu amo esse menino!

Agradeço aos professores da Graduação e da Pós-Graduação, por todos os ensinamentos e por tantas vezes que me incentivaram e inspirarão.

Agradeço a todos os amigos que me incentivaram e contribuíram de alguma forma, muito obrigada!

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida e permanente incentivo à ciência.

“ Fique com medo, mas faça assim mesmo.
O importante é a ação. Você não precisa esperar para ter confiança.
Basta fazê-lo e, eventualmente, a confiança se seguirá. ”
(Carrie Fisher)

RESUMO

Definição de áreas prioritárias à recuperação florestal em bacias hidrográficas a partir de análise multicritério

A dissertação de mestrado, apresentada neste documento, foi escrita em modelo de artigo científico. O documento final da dissertação foi organizado em três seções. A primeira seção com a contextualização geral da pesquisa, fomentada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional (PPGMADRE) da Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE). A segunda seção é composta por um manuscrito, no qual apresenta uma abordagem de validação de mapa de vulnerabilidade à erosão elaborado por diferentes métodos de inferência. A terceira seção apresenta áreas prioritárias para a recuperação florestal em bacias hidrográficas por meio de Análise Multicritério em ambiente SIG. Para a segunda seção adotamos uma bacia hidrográfica e consideramos os seguintes critérios: geomorfologia, pedologia, declividade, densidade de drenagem e cobertura da terra. Dentre os métodos testados: Combinação Linear Ponderada (CLP) e três operadores Fuzzy: soma algébrica, produto algébrico e gamma, variando o expoente “ γ ” entre os valores 0,4; 0,6 e 0,8. Os pesos dos critérios foram definidos com base no Processo Analítico Hierárquico. A validação dos mapas ocorreu usando 1902 pontos, sendo 951 pontos de erosão na área, definidos com base em imagens do *Google Earth Pro*, e 951 pontos sem erosão, gerados aleatoriamente no QGIS 3.8. O modelo de regressão logística foi usado para comparar o desempenho de cada mapa ao apontar as áreas com maior e menor grau de vulnerabilidade. A melhor modelagem foi alcançada com o operador Fuzzy gamma quando parametrizado com $\gamma = 0,6$. Embora o CLP seja a abordagem recorrente em estudos ambientais envolvendo inferência geográfica, nossos resultados demonstram que outros operadores podem produzir resultados mais próximos aos encontrados com a realidade observada em campo. Para a terceira seção trabalhamos com critérios relevantes para a determinação de áreas prioritárias, como: rede de drenagem, distância de rodovias, distância de áreas urbanas, fragmentos de vegetação, e vulnerabilidade a erosão. Os pesos de cada critério foram obtidos a partir do Processo Analítico Hierárquico (AHP). Testamos dois métodos para criação do mapa síntese: CLP (Combinação Linear Ponderada) e operador Fuzzy Gamma. Como resultado obtivemos dois cenários; o primeiro com o método CLP onde priorizamos áreas com fragmentos de vegetação e alta densidade de drenagem, e o segundo com o método Gamma, que priorizou áreas vulneráveis da bacia. Concluímos que o modelo de integração proposto satisfaz a identificação de áreas para a recuperação de florestas em bacias hidrográficas, e que diferentes cenários podem ser construídos.

Palavras-chaves: Inferência geográfica. Análise multicritério. Impacto ambiental. Recuperação florestal. Áreas prioritárias.

ABSTRACT

Definition of priority areas for forest recovery in river basins after multicriteria analysis

The master's thesis, presented in this document, was written in a model of scientific article. The final document of the dissertation was organized into three sections. The first section with the general contextualization of the research, promoted by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) and developed in the Graduate Program in Environment and Regional Development (PPGMADRE) of the University of Western São Paulo (UNOESTE). The second section is composed of a manuscript, in which presents an approach of validation of vulnerability map to erosion elaborated by different methods of inference. The third section presents priority areas for forest recovery in hydrographic basins through Multicriteria Analysis in GIS environment. For the second section we adopted a hydrographic basin and considered the following criteria: geomorphology, pedology, slope, drainage density and land cover. Among the methods tested: Weighted Linear Combination (CLP) and three Fuzzy operators: algebraic sum, algebraic product and gamma, varying the exponent " γ " between the values 0.4; 0.6 and 0.8. The weights of the criteria were defined based on the Hierarchical Analytical Process. The validation of the maps occurred using 1902 points, of which 951 erosion points were in the area, defined based on images from Google Earth Pro, and 951 points without erosion, randomly generated in QGIS 3.8. The logistic regression model was used to compare the performance of each map by pointing out the areas with the highest and lowest degree of vulnerability. The best modeling was achieved with the Fuzzy gamma operator when parameterized with $\gamma = 0.6$. Although CLP is the recurrent approach in environmental studies involving geographic inference, our results show that other operators can produce results closer to those found with the reality observed in the field. For the third section we worked with relevant criteria for the determination of priority areas, such as: drainage network, distance from highways, distance from urban areas, fragments of vegetation, and vulnerability to erosion. The weights of each criterion were obtained from the Hierarchical Analytical Process (AHP). We tested two methods for creating the synthesis map: CLP (Weighted Linear Combination) and Fuzzy Gamma operator. As a result we obtained two scenarios; the first with the PLC method where we prioritized areas with vegetation fragments and high drainage density, and the second with the Gamma method, which prioritized vulnerable areas of the basin. We conclude that the proposed integration model satisfies the identification of areas for forest recovery in watersheds, and that different scenarios can be constructed.

Key-words: Geographical inference. Multicriteria analysis. Environmental impact. Forest recuperation. Priority areas.

LISTA DE FIGURAS

MANUSCRITO 1

Figura 1 - Área de estudo e distribuição espacial dos pontos de validação.....	19
Figura 2 - Mapa de vulnerabilidade à erosão para a bacia hidrográfica do rio Pirapozinho obtido por diferentes modelos de inferência geográfica.....	27
Figura 3 - Dispersão do conjunto de pontos (com e sem erosão) para cada modelo de inferência usado.....	28
Figura 4 - Curvas ROC da validação por regressão logística em cada modelo de incerteza.....	29
Figura 5 - Gráfico dos pontos na regressão logística de acordo com o modelo empregado.....	30

MANUSCRITO 2

Figura 1 - Área de estudo.....	38
Figura 2 - Escala contínua para elaboração da matriz de comparação pareada.....	41
Figura 3 - Mapa de distância para definição das áreas prioritárias para reflorestamento na bacia hidrográfica do rio Pirapozinho.....	43
Figura 4 - Mapa de áreas prioritárias para reflorestamento na bacia do rio Pirapozinho obtido pelo método CLP.	44
Figura 5 - Mapa de áreas prioritárias para reflorestamento na bacia do rio Pirapozinho obtido por diferentes operadores gamma.....	45
Figura 6 - Áreas que devem ser prioritárias para reflorestar.....	46

LISTA DE TABELAS

MANUSCRITO 1

Tabela 1 – Matriz de pesos das subclasses dos critérios (variáveis) definidos pelo AHP.....	22
Tabela 2 – Matriz de pesos dos critérios definidos pelo AHP.....	22
Tabela 3 – Valores descritivos de cada conjunto amostral.....	28
Tabela 4 – Performance de cada modelo de incerteza de acordo com a regressão logística.....	29

MANUSCRITO 2

Tabela 1 – Tamanho dos fragmentos de vegetação e seus respectivos pesos.....	40
Tabela 2 – Matriz de pesos dos critérios definidos pelo AHP.....	41

LISTA DE SIGLAS

AHP	–	Analytic Hierarchy Process
AUC	–	Area Under the Curve
CAPES	–	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CLP	–	Combinação Linear Ponderada
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	–	Índice de Consistência
IPT	–	Instituto de Pesquisa Tecnológica
IR	–	Índice Aleatório
MDS	–	Modelo digital de superfície
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
PPGMADRE	–	Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional
PROINTER	–	Programa de Pesquisa Interdisciplinar
RC	–	Razão de Consistência
ROC	–	Receiver Operating Characteristic
SIG	–	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	–	Shuttle Radar Topography Mission
TVP	–	Taxa de Valores Positivos
UGRHI-22	–	22ª Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Pontal do Paranapanema
WLC	–	Weighted Linear Combination

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
2	MANUSCRITO	15
	Introdução.....	16
	Materiais e métodos	18
	Área de Estudo.....	18
	Organização dos dados cartográficos	19
	Atribuição dos pesos usando o AHP	21
	Inferência geográfica por diferentes modelos lógicos	22
	Validação do mapa de vulnerabilidade à erosão por algoritmo de aprendizagem de máquina.....	24
	Resultados e discussão.....	25
	Conclusão	30
	Referências	31
3	MANUSCRITO	34
	Resumo	34
	Abstract.....	34
	Introdução.....	35
	Materiais e métodos	37
	Área de estudo	37
	Organização dos dados cartográficos	38
	Atribuição dos pesos usando o AHP	40
	Inferência geográfica por diferentes modelos lógicos	41
	Resultados e discussão.....	42
	Conclusão	47
	Referências	48
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
	APÊNDICE.....	53

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este documento está separado em três partes. A primeira consiste na contextualização geral da presente pesquisa que é desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional (PPGMADRE) na Universidade do Oeste Paulista e é fomentada pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). A segunda parte é formada por um manuscrito discutindo a validação de mapa de vulnerabilidade a erosão por aprendizagem de máquina na bacia do rio Pirapozinho. A terceira parte remete a considerações sobre o desenvolvimento do trabalho, bem como suas publicações e suas etapas previstas para o término.

O PPGMADRE é composto por duas linhas de pesquisa, sendo elas: Avaliação e análise de impacto ambiental e Planejamento ambiental e desenvolvimento regional, a qual se encaixa o presente trabalho. O programa é interdisciplinar e concilia questões ambientais ao desenvolvimento regional. Suas linhas de pesquisa trabalham a partir de um Programa de Pesquisa Interdisciplinar chamado PROINTER.

Este relatório de defesa de mestrado contempla uma relevante discussão sobre áreas prioritárias para reflorestamento em bacia hidrográfica, tendo como estudo de caso a bacia do rio Pirapozinho. Adotamos essa bacia devido a possibilidade de uso futuro desta para abastecimento público de águas dos núcleos populacionais dentro ou próximos a ela. Isso corrobora com a proposta do PPGMADRE em discutir o processo de desenvolvimento regional diante das questões ambientais.

2 MANUSCRITO

VALIDAÇÃO DE MAPA DE VULNERABILIDADE A EROSÃO POR APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

Resumo

O processo erosivo é um fenômeno que acontece devido às condições climáticas ou uso inadequado da terra. O mapeamento dos níveis de vulnerabilidade à erosão de uma área pode ocorrer usando diferentes modelos de inferência geográfica. No entanto, definir o método apropriado é ainda uma questão a ser respondida. Este trabalho apresenta uma abordagem de validação de mapa de vulnerabilidade à erosão elaborado por diferentes métodos de inferência. Como estudo de caso, adotou-se uma bacia hidrográfica e considerou-se os seguintes critérios: geomorfologia, pedologia, declividade, densidade de drenagem e cobertura da terra. Dentre os métodos testados tem-se: Combinação Linear Ponderada (CLP) e três operadores Fuzzy: soma algébrica, produto algébrico e gamma, variando o expoente " γ " entre os valores 0,4; 0,6 e 0,8. Os pesos dos critérios foram definidos com base no Processo Analítico Hierárquico. A validação dos mapas ocorreu usando 1902 pontos, sendo 951 pontos de erosão na área, definidos com base em imagens do *Google Earth Pro*, e 951 pontos sem erosão, gerados aleatoriamente no QGIS 3.8. O modelo de regressão logística foi usado para comparar o desempenho de cada mapa ao apontar as áreas com maior e menor grau de vulnerabilidade. A melhor modelagem foi alcançada com o operador Fuzzy gamma quando parametrizado com $\gamma = 0,6$. Embora o CLP seja a abordagem recorrente em estudos ambientais envolvendo inferência geográfica, nossos resultados demonstram que outros operadores podem produzir resultados mais próximos aos encontrados com a realidade observada em campo.

Palavras-chave: Inferência geográfica; análise multicritério; validação de dados; impacto ambiental.

Abstract

Erosion is a natural phenomenon that happens in all ecosystems, whether due to weather conditions or inappropriate land use. Mapping the erosion vulnerability levels of an area can occur using different methods of geographic inference. However, defining the appropriate method is still a question to be answered. This paper presents an erosion vulnerability map validation approach elaborated by different inference methods. As a case study, a watershed was adopted and the following criteria were considered: geomorphology, pedology, slope, drainage density and land cover. Among the tested methods are: Weighted Linear Combination (WLC) and three Fuzzy operators: algebraic sum, algebraic product and gamma, varying the exponent " γ " between the values 0.4; 0.6 and 0.8. The weights of the criteria were defined based on the Hierarchical Analytical Process. The validation of the maps took place using 1902 points, with 951 erosion points in the area defined based on Google Earth Pro images and 951 points without erosion randomly generated in QGIS 3.8. The logistic regression model was used to compare the performance of each map by pointing out the areas with the highest and lowest degree of vulnerability. The best modeling was achieved with the Fuzzy gamma operator when parameterized with $\gamma = 0.6$. Although WLC is the recurring approach in environmental studies involving geographic inference, our results show that other operators can produce results closer to those encountered with the reality observed in the field.

Keywords: Geographical inference; multicriteria analysis; data validation; environmental impact.

Introdução

A erosão é um fenômeno de superfície que ocorre pelo processo físico de desintegração, transporte e deposição de partículas do solo causadas pela água da chuva e escoamento (Silva *et al.*, 2012; Jesus *et al.*, 2019). No Brasil, o risco de degradação do solo é elevado devido às condições climáticas tropicais dominantes. Além disso, o uso inadequado da terra, como substituições de cobertura vegetal por outros tipos de cobertura em áreas frágeis, pode promover o surgimento de feições erosivas (Ding *et al.*, 2013, Porto *et al.*; 2019).

Uma vez que ocorre a erosão no solo, os sedimentos podem ser carregados pelo escoamento superficial até os corpos hídricos e, dependendo da sua concentração, pode comprometer a qualidade da água (Meneses *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 2017). As áreas vulneráveis à erosão podem apresentar influências de fatores naturais (declividade, cobertura vegetal, tipo do solo) ou de fatores antrópicos (uso do solo) (Silva *et al.*, 2014; Reis *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2017). Assim, entender o grau de vulnerabilidade à erosão de uma área é requisito necessário para realizar um planejamento ambiental eficiente e evitar desastres ambientais (Nascimento *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.* 2016).

As geotecnologias otimizam a produção de diversos produtos cartográficos, como um mapa de vulnerabilidade, importantes para o diagnóstico ambiental de uma área. Um mapa de vulnerabilidade é oriundo da combinação de várias informações geográficas, caracterizando um processo de inferência geográfica com análise multicritério. Esse tipo de análise envolve um conjunto de alternativas de decisão, as quais são baseadas em vários critérios de avaliação (Malczewski, 2010). No contexto de problemas espaciais, esses critérios são combinados em um processo cartográfico denominado de álgebra de mapas, resultando em um mapa síntese. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são um tipo de geotecnologias que otimizam a resolução de problemas espaciais de decisão do tipo multicritério, pois permitem integrar de forma rápida e eficaz dados geográficos de diferentes fontes e formatos (Longley *et al.* 2013).

Diante de uma tomada de decisão que envolve a consideração de multicritérios, uma etapa crucial é a definição da contribuição relativa de cada critério. Uma das técnicas mais tradicionais para desenvolver a análise multicritério é a proposta por Thomas Saaty em 1978 denominada de Processo

Analítico Hierárquico (AHP - *Analytic Hierarchy Process*) (Saaty, 1990). O princípio é atribuir o peso aos critérios a partir de uma comparação pareada entre esses. Para tanto, Saaty propôs uma escala de 1 a 9, denominada de Escala Fundamental, sendo o valor 1 atribuído aos critérios de mesma importância relativa, e o valor 9 aos critérios de importância absoluta em relação aos demais (Saaty, 1990).

A partir da definição dos pesos dos critérios pelo AHP, gera-se o mapa síntese pela Combinação Linear Ponderada desses critérios ou, menos tradicionalmente, pela Média Ponderada Ordenada dos critérios (Valente & Vettorazzi, 2005; 2008). A análise multicriterial usando o AHP é empregada em diferentes áreas atendendo a distintas aplicações, incluindo o diagnóstico ambiental de bacias hidrográficas, como em Ross (1994), Fushimi *et al.* (2013), Nossack *et al.* (2014) Valente & Vettorazzi (2008, 2016); Gonçalves *et al.* (2016), Mello *et al.* (2018), Rodrigues *et al.* (2018) e Fushimi *et al.* (2018).

Outro importante método no processo de inferência geográfica é a lógica Fuzzy, que corresponde a uma extensão da lógica Booleana visando manipular o conceito de “verdade parcial”, isto é, valores compreendidos entre “completamente verdadeiro” e “completamente falso” (Câmara *et al.*, 2001). A lógica Fuzzy pode ser aplicada usando diferentes operadores para a combinação dos critérios na análise multicriterial, tais como operador de soma algébrica, operador produto algébrico e o operador gamma. Utilizar conjuntos Fuzzy tornam os conceitos imprecisos, encontrados no meio físico, mais próximos da realidade (Gonçalves *et al.* 2016).

Embora o uso do processo de inferência geográfica seja considerado um clássico para a resolução de problemas de decisão uni e multicritério, e que existam diferentes modelos lógicos que podem ser empregados (por exemplo, AHP, como a Combinação Linear Ponderada, ou a lógica Booleana, lógica Fuzzy), ainda não há um consenso de como a acurácia dos mapas sínteses deve ser validada. Há trabalhos que nem mesmo realizam um controle de qualidade dos produtos gerados por esses modelos, e outros que validam com observações de campo (Samizava *et al.*, 2008; Fushimi *et al.*, 2013; Fushimi *et al.*, 2018; Trevisan *et al.*, 2018). Todavia, nota-se que, em geral, há o uso de poucas amostras de campo, como no trabalho de Samizava *et al.* (2008) que adotam cinco pontos de validação para controle de qualidade do mapa síntese.

Isso levanta o questionamento sobre se esse número reduzido de amostras é representativo para toda a área estudada.

Recentemente, as técnicas de inteligência artificial, mais particularmente, os algoritmos de Aprendizagem de Máquina vêm sendo aplicadas na resolução de problemas cartográficos. Dentre esses vários algoritmos, a regressão logística é uma abordagem adequada para situações nas quais se deseja prever a presença ou ausência de uma determinada característica (presença ou ausência de erosão, por exemplo), baseado em valores de um conjunto de variáveis independentes. No entanto, até o presente momento, não se sabe do uso de algoritmos de aprendizagem de máquina para a validação de mapas obtidos no processo de inferência geográfica.

Nesse sentido, esse trabalho apresenta uma proposta de validação da acurácia de mapa de vulnerabilidade à erosão utilizando um denso conjunto amostral processado pelo algoritmo regressão logística em ambiente de aprendizagem de máquina. Para esta finalidade, elaboramos o mapa de vulnerabilidade à erosão aplicando diferentes modelos lógicos de inferência geográfica, como Combinação Linear Ponderada, sendo os pesos dos critérios determinado pelo método AHP, e lógica Fuzzy com os operadores algébrico soma e produto, e o operador gamma. Com isso, esse trabalho traz não somente uma abordagem generalizada de como validar a acurácia de mapa síntese a partir de técnicas de inteligência artificial, como também apresenta achados relevantes sobre o nível de vulnerabilidade à erosão que se encontra a bacia de estudo de caso, reforçando a necessidade de mitigação dos efeitos antrópicos sobre esta.

Materiais e métodos

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Pirapozinho (Figura 1) foi adotada como área estudo de caso. Com uma área de aproximadamente 1.000 km², esta bacia está inserida na 22^a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Pontal do Paranapanema (UGRHI-22). Essa bacia possui diferenciações físicas quando comparada as demais bacias da UGRHI-22 (Ramos *et al.*, 2018), indicando diferentes cenários de vulnerabilidade à erosão. Outra característica importante

da bacia do rio Pirapozinho, e que a torna uma importante área de estudo de caso, é a possibilidade de uso futuro para abastecimento público de água dos núcleos populacionais dentro ou próximos a ela. Ainda na Figura 1 é apresentado a distribuição espacial do conjunto de pontos de validação adotados nesse trabalho.

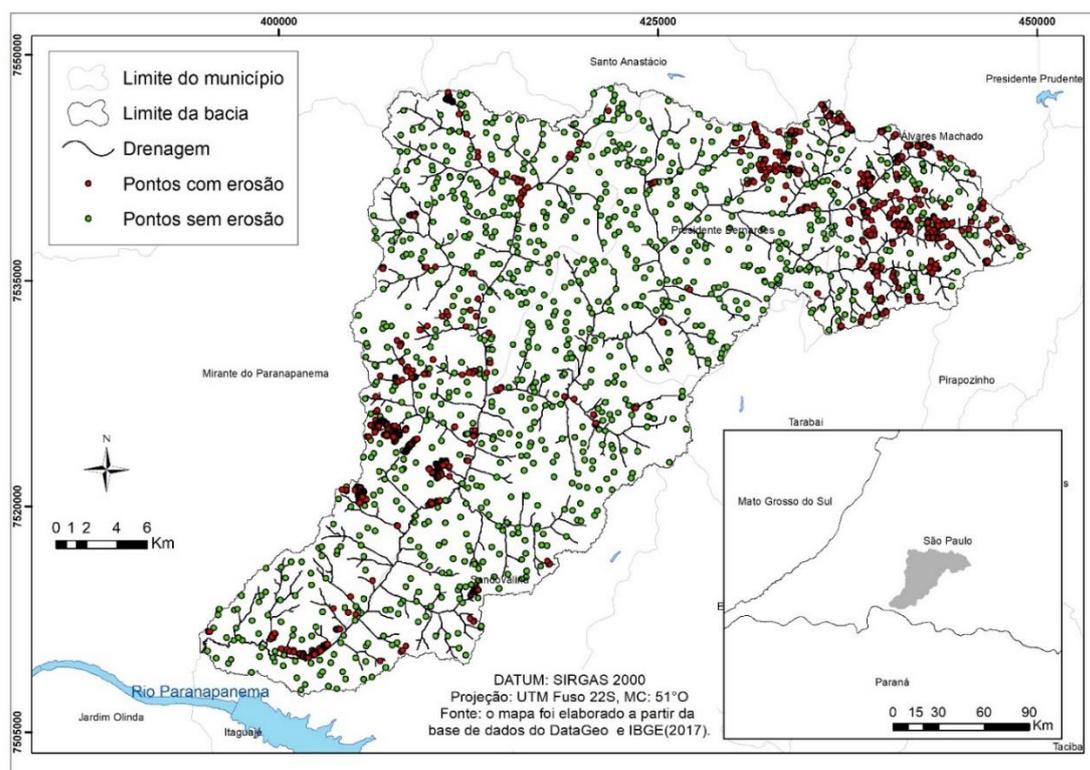


Figura 1. Área de estudo e distribuição espacial dos pontos de validação.

Organização dos dados cartográficos

Os critérios (variáveis) para a elaboração do mapa de vulnerabilidade à erosão da bacia em estudo foram definidos de acordo com a literatura (Fushimi, 2013; Fushimi, 2018). Tais critérios foram: geomorfologia, pedologia, declividade, densidade de drenagem e uso e cobertura da terra.

a) Geomorfologia: está relacionada com a forma das vertentes e o grau de declividade (Viel *et al.*, 2017), intensificando ou não o grau de transporte de sedimentos;

b) Pedologia: os processos de erosão são acelerados pelo uso inadequado do solo, mudanças climáticas, e por suas características naturais. Os tipos de solo são classificados em diferentes classes por suas propriedades, como teor de matéria orgânica, textura, densidade, porosidade e sua estrutura,

que interferem direta ou indiretamente na quebra de agregados e, conseqüentemente, em seu transporte (Oliveira, 2009);

c) Declividade: quanto maior o nível de declividade, maior é o escoamento superficial e mais suscetível ao processo de erosão está o solo. Portanto, um declive acentuado reduz a taxa de infiltração de água no solo e aumenta a sedimentação da rede de drenagem (Silva *et al.*, 2014).

d) Densidade de drenagem: resulta de uma rede de drenagem e calcula a densidade da rede de drenagem dentro de uma área específica (Dobos *et al.*, 2000), ou seja, identifica onde está o maior fluxo e é uma boa indicação do grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem;

e) Uso e cobertura da terra: a substituição de áreas florestais por áreas de usos urbanos e/ou agrícolas pode promover, por exemplo, a redução da qualidade da água devido às erosões causadas pela ausência da vegetação, aumentando o carregamento de sedimentos até os rios (Yang *et al.*, 2016).

Para cada um desses critérios, compilou-se os dados cartográficos existentes para a área de estudo, organizando-os em um banco de dados geográficos. Adotamos o sistema de referência SIRGAS 2000 e a projeção Universal Transverso de Mercator, fuso 22 sul.

A delimitação da área da bacia do rio Pirapozinho foi realizada a partir de processos automáticos (ferramenta *Hidrology*) no SIG ArcGIS 10.2, usando um Modelo Digital de Superfície, de 30 m de resolução espacial, coletado na missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA em 2000. O limite da área da bacia foi utilizado como máscara de recorte para os dados cartográficos de interesse.

Para os critérios 'geomorfologia' e 'pedologia' foram utilizados os dados do Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), de 1999, na escala 1:250.000. Para critério 'uso e cobertura da terra' os dados foram baixados na base de dados contínua do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2017, escala 1:100.000.

Os dados relacionados aos critérios 'densidade de drenagem' e 'declividade' foram extraídos do MDS SRTM. Para a densidade de drenagem, os processamentos foram divididos em 3 etapas, sendo: 1) preenchimento de depressões no MDS (*fill*); 2) cálculo da direção do fluxo da água (*flow direction*) e; geração do fluxo acumulado de água (*flow accumulation*).

Depois de calculado o fluxo acumulado, criou-se a rede de drenagem considerando apenas as células com um fluxo acumulado maior que 100, representado pelo número 1. Esse valor foi considerado pois atendeu as características da área de estudo, podendo ser usado para outras características por meio de tentativa e erro. A equação (1) a seguir foi utilizada para gerar a rede de drenagem.

$$\text{Drenagem} = \text{CON} (\text{flowacc} > 100, 1, 0)$$

O mapa de densidade de drenagem foi obtido pela soma de cada célula do mapa de drenagem em um raio de 1 km, dividido pela área de 1 km², com a ferramenta *focal statistics* e *Neighborhood CIRCLE* no ArcGis 10.2. Assim, obteve-se a quantidade de cursos d'água existentes em um raio de 1km na bacia. Esse valor de raio foi definido a partir da inspeção visual da distribuição da drenagem na área da bacia.

Atribuição dos pesos usando o AHP

O peso dos critérios reflete a importância desses no processo de tomada de decisão, neste caso, na caracterização do nível de vulnerabilidade à erosão da bacia do rio Pirapozinho. Para expressar a importância, ou a ordem de importância dos critérios definidos nesse estudo de caso, empregou-se o AHP tanto para a definição dos pesos de cada variável (Tabela 1) quanto de suas subclasses (Tabela 2). É importante ressaltar que o peso dos critérios (Tabela 2) foi aplicado somente na inferência pela Combinação Linear Ponderada.

Para cada aplicação do AHP, calculou-se a Razão de Consistência (RC) (Equação 2) considerando a matriz de importância relativa dos critérios. A RC indica a probabilidade de o peso do critério ter sido gerado aleatoriamente, isto é, se os pesos atribuídos aos critérios são consistentes.

Tabela 1 – Matriz de pesos das subclasses dos critérios (variáveis) definidos pelo AHP.

Critérios (classe)	Subclasses	Pesos
Geomorfologia	Colinas Médias	0,67521
	Colinas Amplas	0,25314
	Planícies	0,07265
Pedologia	Neossolo	0,59144
	Nitossolo	0,22528
	Argissolo	0,13101
	Latossolo	0,05226
Cobertura da Terra	Urbano	0,47261
	Pecuária	0,24167
	Agricultura	0,16384
	Savana	0,05329
	Floresta	0,03430
	Floresta Aluvial	0,03430

Tabela 2 – Matriz de pesos dos critérios definidos pelo AHP.

Critérios	Pedologia	Geomorfologia	Cobertura da Terra	Declividade	Densidade de drenagem	Pesos
Pedologia	1					0,103775
Geomorfologia	2	1				0,103264
Cobertura da Terra	2	2	1			0,130656
Declividade	2	4	4	1		0,399724
Densidade de drenagem	2	4	4	1/3	1	0,262581

O valor do RC deve ser inferior a 0,10; caso contrário, a matriz de importância relativa deve ser revista para alterar os valores da comparação pareada (Saaty, 1990):

$$RC = IC / IR$$

Em que: IC é o índice de consistência; e IR é o índice aleatório. O IR é um valor tabelado, cujo valor depende da dimensão da matriz (n). O IC é determinado pela razão entre $(\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, em que λ_{max} é o autovalor máximo da matriz.

Inferência geográfica por diferentes modelos lógicos

Antes de realizar a álgebra de mapas, isto é, a combinação dos critérios para a produção do mapa síntese, deve-se padronizar os dados em uma escala

comum de valores. Essa padronização foi realizada considerando a escala de 0 e 1, em que o valor 0 representa as áreas não vulneráveis à erosão, e o valor 1 as áreas que estão totalmente vulneráveis à erosão. Realizamos essa operação por meio da ferramenta *Fuzzy Membership* do software ArcGIS 10.2. O.

O mapa de vulnerabilidade à erosão foi elaborado por meio de diferentes modelos lógicos de inferência geográfica, sendo os quais a Combinação Linear Ponderada (CLP) juntamente com o método AHP, e lógica Fuzzy (linear), considerando três operadores distintos: soma algébrica; produto algébrico e; operador gamma.

A Combinação Linear Ponderada, proposta por Voogd (1983), constitui-se da soma dos critérios multiplicados por seus respectivos pesos. Assim como os operadores Fuzzy, a abordagem da CLP é realizar uma operação pixel a pixel (dos mapas dos fatores, ou denominados de critérios), permitindo utilizar critérios com variação contínua. Seu resultado é um mapa quantitativo expressando o grau de importância relativa por meio dos valores numéricos de saída (Câmara *et al.*, 2001).

A lógica Fuzzy é indicada sempre que se tiver que lidar com ambiguidades (Câmara, *et al.* 2001). Há vários operadores para produzir um mapa síntese por lógica Fuzzy, dentre os quais o produto algébrico, a soma algébrica e o operador gamma. No operador produto algébrico (equação 3) o valor de pertinência Fuzzy de saída é a multiplicação dos valores dos pixels dos mapas de entrada referente a cada critério. Os valores de pertinência tendem a ser muito pequenos quando se utiliza este operador, devido ao efeito de se multiplicar diversos números menores do que 1:

$$\mu = \pi \mu_i$$

A operação por soma algébrica (Equação 4) não consiste em uma simples soma algébrica dos mapas de entrada, mas representa um operador complementar ao produto algébrico. Assim, o resultado é sempre um valor maior ou igual ao maior valor de pertinência fuzzy de entrada (Câmara, *et al.* 2001):

$$\mu = 1 - \pi (1 - \mu_i)$$

O operador gamma é definido pela multiplicação de dois termos: uma soma algébrica e um produto algébrico, sendo ambos elevados a um expoente gamma.

$$\mu = (\text{Soma algébrica Fuzzy})^\gamma \times (\text{Produto algébrico Fuzzy})^{1-\gamma}$$

A importância de cada termo (soma ou produto algébrico *Fuzzy*) no operador gamma é definida atribuindo-se valores entre 0 e 1 para o expoente “ γ ”. Nesse trabalho, adotamos três variações para esse expoente, sendo os valores 0,4; 0,6 e 0,8 para identificar a melhor dispersão do conjunto de pontos de cada modelo. A escolha dos valores do expoente “ γ ” foi para que os três valores diferentes estivessem bem espalhados entre o intervalo 0 e 1.

Validação do mapa de vulnerabilidade à erosão por algoritmo de aprendizagem de máquina

Um total de 1902 pontos foram utilizados na validação do mapa de vulnerabilidade à erosão produzido para a bacia do rio Pirapozinho. Desses, 951 correspondem a locais de erosão na área em estudo, os quais foram determinados pela fotointerpretação de Imagens do *Google Earth Pro*.

Para gerar os pontos 951 sem erosão na bacia de interesse, inicialmente geramos aleatoriamente (ferramenta *Point Sampling Tool*) esses pontos com o software QGIS 3.8 e, posteriormente, verificamos visualmente nas imagens do *Google Earth Pro* se algum desses pontos encontravam-se em áreas de erosão. Em caso afirmativo, esse ponto foi substituído por um ponto sem erosão. Posteriormente, aos pontos que correspondem a áreas de erosão, foi atribuído o valor 1, e o valor 0 aos pontos sem erosão.

Para cada localização dos pontos de validação (representando locais com e sem erosão), foi extraído o valor de pixel correspondente em cada um dos modelos de inferência aplicados. Esses dados foram organizados em uma tabela e carregados no *software* Orange 3.21. Nesse ambiente de aprendizagem de máquina, adotou-se o algoritmo de regressão logística para determinar a acurácia de cada modelo de incerteza criado. Para tanto, foi selecionado o dado de referência (pontos de validação) como alvo (*target*) e os dados provenientes do modelo de inferência como característica (*feature*). Com isso, o modelo de regressão logística foi determinada (faz a predição) o valor do dado de referência

com base no valor do dado de característica. A regressão logística foi aplicada com a regularização do tipo Ridge (L2) com força $C=1$, considerando na validação da performance do algoritmo a validação cruzada em 10 k-folders em modo estratificado e taxa de aprendizagem de 0,01% em modo constante. Esses foram os valores que apresentaram maior estabilidade para o modelo de regressão diante do conjunto amostral utilizado. O processo de validação da acurácia do mapa de vulnerabilidade foi realizado individualmente para modelo de inferência utilizado.

A comparação do desempenho dos modelos de inferência foi realizada pelo calculado dos valores de AUC (*Area Under the Curve* - Área sob a curva), Acurácia Global, F1-Score, Precisão e Sensibilidade. Além disso, para uma comparação visual do desempenho dos modelos, construiu-se a curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), para cada modelo de incerteza empregado. A ROC é um gráfico criado a partir dos valores de Taxa de Valores Positivos (TVP), também conhecido como sensibilidade do modelo, versus a Taxa de Valores Falso-Positivos para vários valores de limiares (threshold).

Resultados e discussão

Para cada modelo de inferência aplicado, obteve-se um mapa de vulnerabilidade à erosão da bacia (Figura 2), a qual varia de baixa a alta vulnerabilidade. Em cada mapa, as regiões no matiz (cor) verde indicam menor vulnerabilidade à erosão, e quanto mais próximo ao vermelho, maior vulnerabilidade. Uma análise visual desses produtos revela que a variação no modelo lógico de inferência gera resultados muito distintos (comparação entre CLP e AHP com o modelo Fuzzy por operação de produto algébrico, por exemplo). Isso está relacionado à forma de construção do modelo de inferência, revelando a importância de se validar os resultados com verdades terrestres (pontos de verificação), para se garantir o nível de representatividade do mapa com a realidade em campo.

Outra análise visual dos resultados foi realizada pelo gráfico de dispersão do conjunto de pontos de validação, para cada modelo de inferência (Figura 3). Observamos que no modelo Fuzzy, com o operador gamma sendo o expoente 0,6 (Figura 3), os pontos com e sem erosão não se interceptam em nenhum momento. Isso mostra que esse modelo garantiu melhor separabilidade entre os

pontos com erosão dos pontos sem erosão na área estudada. Uma análise descritiva desse modelo (Tabela 3) mostra que o valor mínimo dos pixels, representando pontos com erosão foi de 0,65 e o valor máximo para os pontos sem erosão foi de 0,21, provando a capacidade desse operador em separar esses pontos com e sem erosão.

Os mapas gerados pelo modelo Fuzzy com o operador produto e gamma (com expoente de 0,4) foram muito similares (Figura 2). Enquanto o resultado com o gamma 0,6 e 0,8 são mais parecidos (Figura 2). Observamos que quanto maior o valor do expoente gamma, mais próximo o resultado foi do operador produto e quanto menor, mais próximo ao do operador soma.

O resultado gerado pelo modelo CLP é o que mais apresenta uma mistura entre os pontos com e sem erosão (Figura 2). Isso se confirma ao se analisar a dispersão dos valores de mínimo e máximo dos pixels nesses pontos de validação (Figura 3).

O mapa síntese obtido pela modelagem Fuzzy por soma algébrica (Figura 2B) mostra que a bacia em estudo se encontra com alto nível de vulnerabilidade à erosão em sua porção Noroeste. Esse mesmo resultado é ressaltado, porém, em menor intensidade, nos mapas sínteses gerados pelos demais modelos de inferência, com exceção ao modelo Fuzzy por produto algébrico. A porção Noroeste da bacia do rio Pirapozinho apresenta alta densidade de drenagem associada com altos valores de declividade, e que esses critérios foram os que obtiveram maior peso na ponderação pelo AHP (Tabela 2).

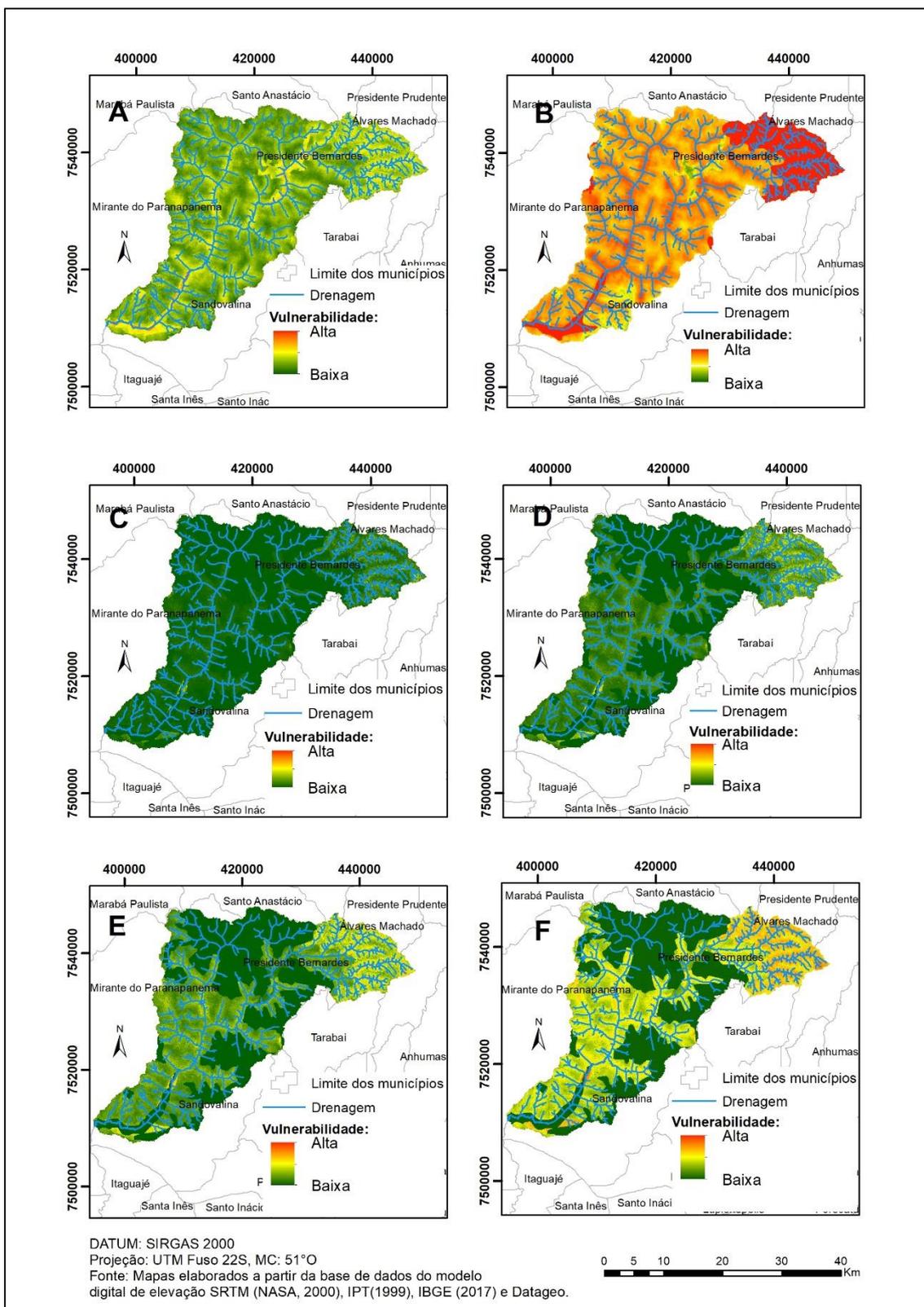


Figura 2. Mapa de vulnerabilidade à erosão para a bacia hidrográfica do rio Pirapozinho obtido por diferentes modelos de inferência geográfica. (A) AHP e CLP; (B) Fuzzy por soma algébrica; (C) Fuzzy por produto algébrico; (D) Fuzzy por operador gamma com expoente de 0,4; (E) Fuzzy por operador gamma com expoente de 0,6 e; (F) Fuzzy por operador gamma com expoente de 0,8.

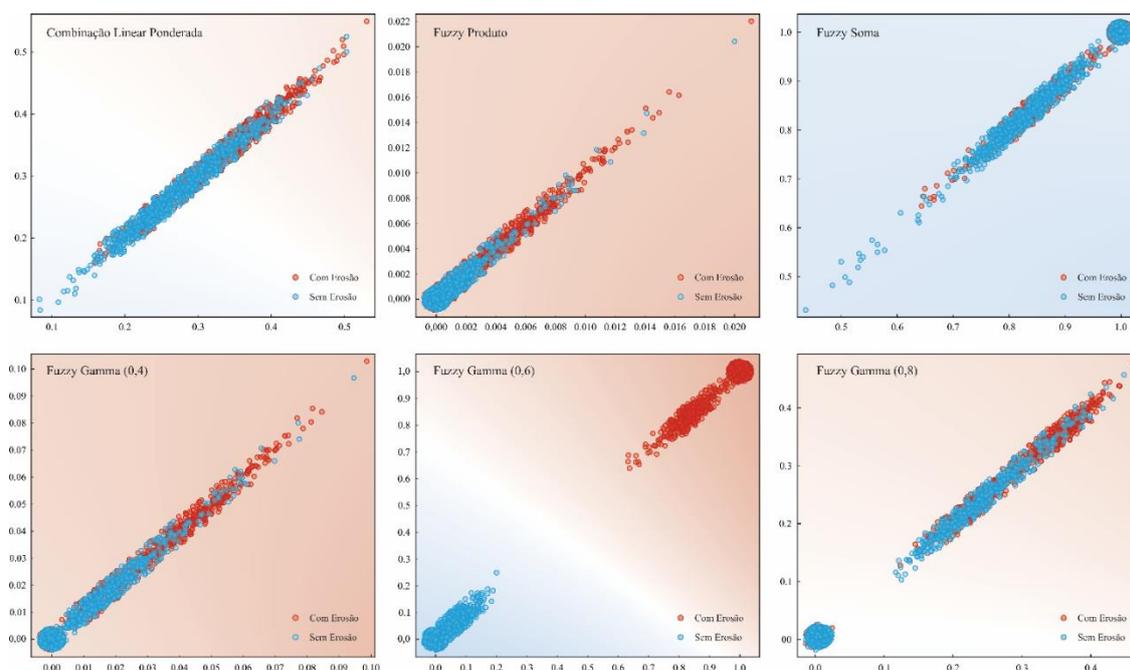


Figura 3. Dispersão do conjunto de pontos (com e sem erosão) para cada modelo de inferência usado.

Tabela 3. Valores descritivos de cada conjunto amostral.

Métrica	CLP		Fuzzy Produto		Fuzzy Soma		Fuzzy Gamma (0,4)		Fuzzy Gamma (0,6)		Fuzzy Gamma (0,8)	
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Valor mínimo	0,08	0,15	0,00	0,00	0,43	0,65	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,00
Valor máximo	0,50	0,53	0,02	0,02	1,00	1,00	0,09	0,09	0,21	1,00	0,45	0,46
Média	0,27	0,32	0,00	0,00	0,85	0,92	0,01	0,03	0,03	0,92	0,14	0,24
Desvio-padrão	0,06	0,06	0,00	0,00	0,09	0,08	0,01	0,02	0,01	0,09	0,13	0,12
Mediana	0,27	0,32	0,00	0,00	0,84	1,00	0,00	0,02	0,00	1,00	0,16	0,26
Coefficiente de Variação	22,63	18,97	173,17	98,40	10,61	9,47	124,43	71,19	108,20	9,47	93,88	49,66

Sem erosão (0); com erosão (1). CLP = Combinação Linear Ponderada.

As curvas ROC mostradas na Figura 4 permitem comparar os modelos de inferência, além de demonstrar o desempenho individual máximo de cada um deles. Esse desempenho é medido a partir dos valores de AUC. A inferência pelo modelo Fuzzy gamma com expoente de 0,6 apresentou a maior curva ROC e teve maior AUC, seguida do modelo gamma 0,8 e 0,4, respectivamente (Tabela 4). O gamma 0,6 não apresentou nenhum ponto classificado erroneamente (ponto de erosão predito como ponto sem erosão, por exemplo), seja para as áreas com erosão, seja para as áreas sem erosão. Por essa razão a sua acurácia, precisão e sensibilidade foram iguais a 100%. Os demais modelos

apresentaram precisão entre 65 e 69% (Tabela 4), com exceção da modelagem Fuzzy com produto algébrico que teve pior resultado, na ordem de 25% na sua precisão. A Figura 5 indica os modelos e as retas que melhor conseguiram separar cada valor predito pela regressão logística. As retas foram formadas a partir do valor de limiar que atingiu a melhor performance na curva ROC. Torna-se novamente evidente a capacidade do modelo gamma, com expoente 0,6, em separar os pontos com erosão dos pontos sem erosão na área mapeada.

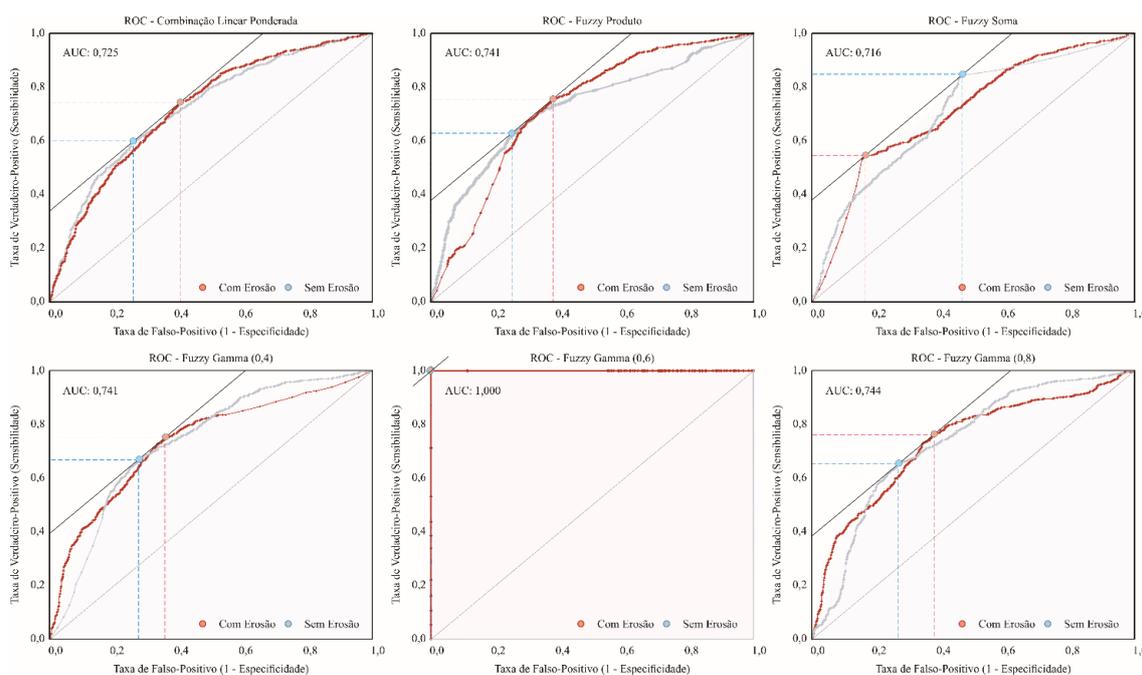


Figura 4. Curvas ROC da validação por regressão logística em cada modelo de incerteza.

Tabela 4 - Performance de cada modelo de incerteza de acordo com a regressão logística.

Método	AUC	Acurácia Global	F1-Score	Precisão	Sensibilidade
CLP	0,725	65,9 %	65,9 %	65,9 %	65,9 %
Produto	0,741	50,1 %	33,4 %	25,1 %	50,1 %
Soma	0,716	65,0 %	65,0 %	65,2 %	62,4 %
Gamma (0,4)	0,741	67,9 %	67,8%	68,1 %	67,9 %
Gamma (0,6)	1,000	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Gamma (0,8)	0,744	68,2 %	67,8 %	69,3 %	68,2 %

CLP = Combinação Linear Ponderada.

Mostramos que nesse caso de vulnerabilidade à erosão o CLP não foi o método que apresentou a melhor acurácia, demonstrando então a importância da validação dos mapas. Os resultados confrontaram a literatura, uma vez que grande parte dos artigos (Rahman et al, 2009; Dias et al., 2014; Traficante et al., 2017; Vettorazzi et al., 2017; Rodrigues et al., 2018) usam a CLP e AHP em problemas de inferência, e mostramos que nem sempre ele é o melhor.

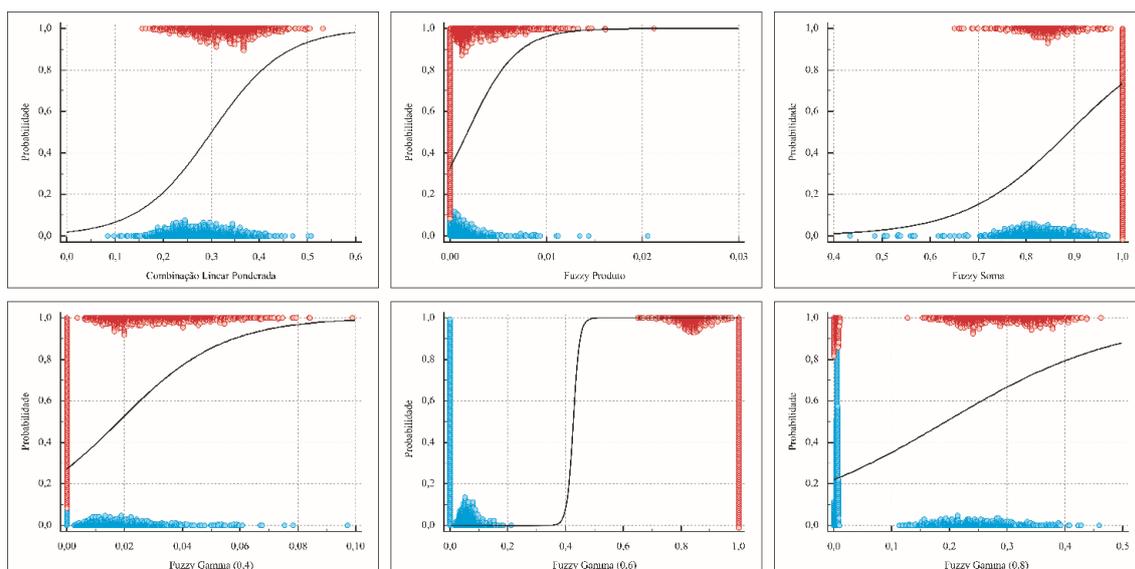


Figura 5. Gráfico dos pontos na regressão logística de acordo com o modelo empregado.

Conclusão

Concluimos que o modelo de inferência Fuzzy com o operador gamma foi o que melhor se ajustou ao conjunto de dados de validação testados pelo algoritmo de regressão logística. Esse operador apresentou eficiência ótima quando o valor do expoente gamma 0,6 foi atribuído, mas quando adotado os valores 0,4 e 0,8 o comportamento não foi o mesmo e a performance foi reduzida. Isso nos permite concluir sobre a necessidade de testar diversos valores para esse parâmetro de expoente na modelagem Fuzzy pelo operador gamma.

A análise da acurácia por meio dos pontos de validação usando a regressão logística em ambiente de aprendizagem de máquina se mostrou uma abordagem eficaz. Isso porque permitiu identificar o mapa síntese que melhor representa a realidade em campo, ao se determinar nível de precisão dos modelos de inferência.

Referências

- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V., 2001. Introdução à Ciência da Geoinformação. **INPE**, São José dos Campos – SP.
- Dias, V. S. B.; Silva, A. B., 2014. AHP na Modelagem da vulnerabilidade ambiental do minicorredor ecológico Serra das Onças (BA). **Revista Brasileira de Cartografia** 66, p. 1363-1377.
- Ding, S.; Zhang, Y.; Liu, B.; Kong, W.; Meng, W., 2013. Effects of riparian land use on water quality and fish communities in the headwater stream of the Taizi River in China. **Frontiers of Environmental Science & Engineering** 7, p. 699-708.
- Dobos, E.; Micheli, E.; Baumgardner, M. F.; Biehl, L.; Helt, T., 2000. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. **Geoderma** 97, p. 367-391.
- Fushimi, M.; Nunes, J. O. R., 2018. Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares das paisagens de parte dos municípios de Marabá Paulista (SP) e Presidente Epitácio (SP), Brasil. **Revista da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia (Anpege)** 14, p. 05-27.
- Fushimi, M.; Nunes, J. O. R.; Nakamura, R. Y.; TAKATA, L. T. O., 2013. Vulnerabilidade ambiental e aplicação de técnicas de contenção aos processos erosivos lineares em áreas rurais no município de Presidente Prudente – SP. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 14, p. 343-356.
- Gonçalves, S. R. A.; Araújo, R. R.; Imai, N. N., 2016. Mapeamento do grau de fragilidade com processo analítico hierárquico e operadores fuzzy gama na detecção áreas de fragilidade ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia** 68, p. 327-337.
- Jesuz, C. R.; Cabral, I. L. L., 2019. Análise da erosão laminar em áreas com uso agrícola e pastagem: bacia hidrográfica do rio Tenente Amaral – MT. **Geosul** 34, 254-279.
- Malczewski, J., 2010 Multiple Criteria Decision Analysis and Geographic Information Systems. In: GRECO, S.; EHRGOTT, M.; Figueira, J. R. Multiple Criteria Decision Analysis, 02, 369-395.
- Mello, K.; Costa, D. R.; Valente, R. A.; Vettorazzi, C. A., 2018. Multicriteria Evaluation for Protected Area Definition Aiming at Water Quality Improvement. **Floresta e Ambiente** 25. doi: 10.1590/2179-8087.013416
- Meneses, B. M.; Reis, R.; Vale, M. J.; Saraiva, R., 2015. Land use and land cover changes in Zêzere watershed (Portugal) – Water quality implications. **Science of the Total Environment**, 527, p. 439-447.
- Nascimento, N. S.; Vieira, E. M.; Gonçalves, J. A. C.; Cunha, G. P. Q., 2016. Estudo da vulnerabilidade ambiental em uma micro bacia hidrográfica empregando hierarquia nominal e operador local. **Revista Brasileira de Geografia Física** 09, p. 897-916.
- Nossack, F. A.; Zimback, C. R. L.; Silva, R. F. B.; Sartori, A. A. C., 2014. Aplicação de análise multicriterial para determinação de áreas prioritárias à recomposição florestal. **Irriga – Brazilian Journal of irrigation and drainage**, 19, 612-625.

Oliveira, P. T. S.; Rodrigues, D. B. B.; Alves Sobrinho, T.; Panachuki, E., 2009. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Geociência**, São Paulo 28, p. 417-424.

Porto, D. T.; Basso, L. A.; Strohaecker, T. M., 2019. Diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do rio Mampituba, região Sul do Brasil, utilizando a Matriz FPEIR. **Geosul**, 34, 58-50.

Rahman, M. R.; Chongfa, C., 2009. Soil erosion hazard evaluation-An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. **Ecological Modelling**, 220, p. 1724-1734.

Ramos, A. P. M.; Rodrigues, B. M.; Osco, L. P.; Antunes, P. A., 2018. Abordagem sistemática de projeto cartográfico para a análise da qualidade ambiental de bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 11, p. 1079-1100.

Reis, T. E.; Costa, V. C., 2017. Análise da vulnerabilidade na zona de amortecimento do Parque Estadual do Ibitipoca -(MG), com o uso de SIG. **Geosul**, 32, 77-96.

Ribeiro, A. S.; Mincato, R. L.; Curi, N.; Kawakubo, F. S., 2016. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física** 09, p. 016-031.

Rodrigues, T.; Tommaselli, J. T. G.; Arroio Junior, P. P., 2018. Mapeamento da vulnerabilidade aos processos erosivos a partir de métodos multicriteriais: um estudo sobre as condições ambientais da bacia hidrográfica da represa da Laranja Doce, Martinópolis – SP. **Revista Formação (Online)**, v. 25, n. 45, p. 67-91.

Ross, J. L. S., 1994. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do departamento de Geografia**, 08, p. 3-74.

Saaty, Thomas L., 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, North-Holland. 48, p. 9-26.

Samizava, T. M.; Nunes, J. O. R.; Imai, N. N.; Kaida, R. H., 2008. Suavização dos contatos entre compartimentos de relevo através de modelagem por inferência Fuzzy: mapeamento geomorfológico no município de Presidente Prudente – SP – Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 09, p. 65-73.

Shi, P.; Zhang, Y.; Li, Z.; Li, P.; Xu, G., 2017. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. **Catena**, v. 151, p. 182-190.

Silva, G. R. V.; Souza, Z. M.; Filho, M. V. M.; Barbosa, R. S.; Souza, G. S., 2012. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36, p. 963-970.

Silva, P. L.; Andrade, L. N. P. S.; Leandro, G. R. S.; Souza, A. S., 2017. Evolução dos processos erosivos e aspectos granulométricos em um sistema de voçoroca no Distrito de Vila Aparecida, município de Cáceres – Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física** 10, p. 627-640.

Silva, V. C. B.; Machado, P. S., 2014. SIG na análise ambiental: susceptibilidade erosiva da bacia hidrográfica do córrego Mutuca, Nova Lima – Minas Gerais. **Revista de Geografia (UFPE)** 31, p. 66-87.

Traficante, D. P.; Campos, S.; Manzione, R. L.; RODRIGUES, B. T., 2017. Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Capivara, Botucatu-SP. **Energia na agricultura** 32, p. 88-95.

Trevisan, D. P.; Moschini, L. E.; Dias, L. C. C.; Gonçalves, J. C., 2018. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de São Carlos – SP. **O espaço geográfico em análise** 44, p. 272-288.

Valente, R. O. A.; Vettorazzi, C. A., 2005. Comparação entre métodos de avaliação multicriterial, em ambiente SIG, para a conservação e a preservação florestal. **Scientia Forestalis** 26, 51-61.

Valente, R. O. A.; Vettorazzi, C. A., 2008. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. **Forest Ecology and Management** 256, 1408-1417.

Valente, R. A.; Petean, F. C. S.; Vettorazzi, C. A., 2017. Multicriteria decision analysis for prioritizing areas for forest restoration. **CERNE** 23, p. 53-60.

Vettorazzi, C. A. Valente, R. O. A., 2016. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources. **Ecological Engineering** 94, 255-267.

Viel, J. A.; Rosa, K. K.; Hoff., 2017. Estudo da erosão superficial do solo por meio de SIG na região da denominação de origem Vale dos Vinhedos (Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 18.

Voogd, J., 1983. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. London: Pion, p. 125.

Yang, H.; Wang, G.; Wang, L.; Zheng, B., 2016. Impact of land use change on water quality in headwaters of the Three Gorges Reservoir. **Environmental Science and Pollution Research**, 23, p. 11448-11460.

3 MANUSCRITO

DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA A RECUPERAÇÃO FLORESTAL EM BACIA HIDROGRÁFICA A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Resumo

A recuperação florestal em bacias hidrográficas é essencial para aumentar a produção de água de boa qualidade para consumo. Contudo, essa prática exige um planejamento adequado que aponte áreas prioritárias para o investimento de recursos econômicos e humanos no reflorestamento. O objetivo deste estudo foi identificar as áreas prioritárias para a recuperação florestal em bacias hidrográficas por meio de Análise Multicritério em ambiente SIG. Como estudo de caso adotamos a bacia hidrográfica do rio Pirapozinho, São Paulo, que possui uma área de aproximadamente 1.000 km² coberta por apenas 6,5% de vegetação. Como critérios relevantes para a determinação de áreas prioritárias, adotamos: rede de drenagem, distância de rodovias, distância de áreas urbanas, fragmentos de vegetação, e vulnerabilidade a erosão. Os pesos de cada critério foram obtidos a partir do Processo Analítico Hierárquico (AHP). Testamos dois métodos para criação do mapa síntese: CLP (Combinação Linear Ponderada) e operador Fuzzy Gamma. Como resultado obtivemos dois cenários; o primeiro com o método CLP onde priorizamos áreas com fragmentos de vegetação e alta densidade de drenagem, e o segundo com o método Gamma, que priorizou áreas vulneráveis da bacia. Concluimos que o modelo de integração proposto satisfaz a identificação de áreas para a recuperação de florestas em bacias hidrográficas, e que diferentes cenários podem ser construídos.

Palavras-chave: Inferência geográfica; análise multicritério; recuperação florestal; áreas prioritárias, SIG.

Abstract

Forest recovery in river basins is essential to increase the production of good quality drinking water. However, this practice requires proper planning that points out priority areas for investing economic and human resources in reforestation. The objective of this study was to identify priority areas for forest recovery in watersheds by means of Multicriteria Analysis in GIS environment. As a case study we adopted the Pirapozinho river basin, São Paulo, which has an area of approximately 1,000 km² covered by only 6.5% of vegetation. As relevant criteria for determining priority areas, we adopted: drainage network, distance from highways, distance from urban areas, vegetation fragments, and vulnerability to erosion. The weights of each criterion were obtained from the Hierarchical Analytical Process (AHP). We tested two methods for creating the synthesis map: PLC (Weighted Linear Combination) and Fuzzy Gamma operator. As a result we got two scenarios; the first with the PLC method where we prioritize areas with vegetation fragments and high drainage density, and the second with the Gamma method, which prioritized geotechnically vulnerable areas of the basin. We conclude that the proposed integration model satisfies the identification of areas for forest restoration in watersheds, and that different scenarios can be constructed.

Keywords: Geographical inference; multicriteria analysis; forest recovery; priority areas, GIS.

Introdução

A supressão de áreas florestadas e a sua substituição por outras coberturas contribuem de forma significativa para os processos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos nos canais de drenagem (Serpa *et al.*, 2015; Ouyang *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2018). As matas ciliares protegem a superfície do solo dos processos erosivos, assim como a vegetação ao redor de nascentes as protegem contra a compactação e o assoreamento (Filoso *et al.*, 2017; Magnani *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2018).

A ausência da vegetação pode causar mudanças na interação do ecossistema, especialmente na dispersão de populações e no isolamento reprodutivo (Valente *et al.*, 2017). Isso pode causar problemas e áreas pequenas podem não oferecer alimento suficiente para manter populações viáveis, fazendo com que parte das espécies seja aos poucos extinta (Brancaion *et al.*, 2016).

Afim de garantir a conservação e a preservação da estrutura e processos da paisagem, o reflorestamento dirigido em bacias hidrográficas, notadamente por meio de ações de recuperação florestal em áreas prioritárias, tem sido apontado como um dos principais meios para aumentar a produção de água de boa qualidade e, portanto, um método efetivo e econômico no manejo de bacias. Exemplos de trabalhos nessa temática são realizados no México (Uribe *et al.*, 2014), na China (Hu, *et al.*; 2017), na África (Monstert *et al.*, 2018), e no Brasil Catelani *et al.* (2012), Sartori *et al.* (2012), Nossack *et al.* (2014), Vettorazzi *et al.* (2016), Valente *et al.* (2017), Mello *et al.* (2018), Almeida (2019).

No que se refere à espacialização dessas ações, o principal componente com a capacidade de integração e análise dos diferentes fatores que compõem a paisagem são os Sistema de Informação Geográfica (SIG), que tem facilitado o planejamento, a otimização e o sucesso das ações de conservação e de preservação florestal (Kangas *et al.*, 2000). Esse tipo de análise envolve um conjunto de alternativas de decisão, as quais são baseadas em vários critérios de avaliação (Malczewski, 2010).

Em uma abordagem multicritério, os critérios característicos de uma paisagem são representados por pesos diferentes, o que define a importância de cada um desses fatores no processo de tomada de decisão. Uma das técnicas mais tradicionais para desenvolver a análise multicritério é a proposta por Thomas Saaty em 1978 denominada de Processo Analítico Hierárquico (AHP

- *Analytic Hierarchy Process*) (Saaty, 1990). O princípio é atribuir o peso aos critérios a partir de uma comparação pareada entre esses. Para tanto, Saaty propôs uma escala de 1 a 9, denominada de Escala Fundamental, sendo o valor 1 atribuído aos critérios de mesma importância relativa, e o valor 9 aos critérios de importância absoluta em relação aos demais (Saaty, 1990).

A partir da definição dos pesos dos critérios pelo AHP gera-se um mapa síntese pela Combinação Linear Ponderada desses critérios ou, menos tradicionalmente, pela Média Ponderada Ordenada dos critérios (Valente & Vettorazzi, 2005; 2008; Uribe *et al.*, 2014).

A análise multicriterial usando o AHP foi empregada em diferentes áreas atendendo a distintas aplicações, incluindo o diagnóstico ambiental de bacias hidrográficas, como em Ross (1994), Fushimi *et al.* (2013), Nossack *et al.* (2014), Valente *et al.* (2008), Uribe *et al.* (2014), Vettorazzi *et al.* (2016), Gonçalves *et al.* (2016), Hu *et al.* (2017), Mello *et al.* (2018), Monstert *et al.* (2018), Rodrigues *et al.* (2018) e Fushimi *et al.* (2018). Considerando a literatura, observou-se a ausência de trabalhos testando métodos diferentes para a criação dos mapas síntese para áreas prioritárias à recuperação florestal, como CLP e operador Fuzzy Gamma.

Um importante método no processo de inferência geográfica é a lógica Fuzzy, que corresponde a uma extensão da lógica Booleana visando manipular o conceito de “verdade parcial”, isto é, valores compreendidos entre “completamente verdadeiro” e “completamente falso” (Câmara *et al.*, 2001). A lógica Fuzzy pode ser aplicada usando diferentes operadores para a combinação dos critérios na análise multicritério, sendo um deles o operador Gamma. Utilizar conjuntos Fuzzy tornam os conceitos imprecisos, encontrados no meio físico, mais próximos da realidade (Gonçalves *et al.* 2016).

Uma região no estado de São Paulo com sérios problemas ambientais devido à forma de uso e ocupação de suas terras é o Pontal do Paranapanema. Essa área, de aproximadamente 19 mil km², é considerada protagonista nas discussões acerca do processo de ocupação territorial e a participação do agronegócio canavieiro (Arana, 2019). Segundo a Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo (ITESP, 2013), a região possui um histórico de intensa ocupação territorial e, de uma forma geral, sem o devido planejamento ambiental que vise reduzir os impactos oriundos dessa ocupação.

O Pontal do Paranapanema é formado por 7 bacias hidrográficas, sendo uma delas a do rio Pirapozinho com 1000 km². A atual forma de uso e ocupação da bacia do rio Pirapozinho tem contribuído de forma negativa para a interferência na qualidade de seus recursos hídricos (Rodrigues *et al.*, 2018). Essa bacia possui um déficit vegetativo muito alto, visto que apenas 6,5% do total da área possui vegetação. As áreas de pastagem e de culturas correspondem a 62,2% e 26,1% respectivamente (Rodrigues *et al.* 2018).

A característica de extensão territorial, disponibilidade de água em quantidade e qualidade dessa bacia indica a necessidade de recuperação da sua vegetação. Esse cenário evidencia a necessidade de novos estudos nessa temática voltado para a bacia do Rio Pirapozinho, considerando suas características e utilizando outros métodos, além do que está sendo abordado na literatura. Também é importante destacar a possibilidade do seu uso futuro para abastecimento público de água dos núcleos populacionais dentro ou próximos dessa bacia. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi identificar as áreas prioritárias para a recuperação florestal em bacias hidrográficas por meio de Análise Multicritério em ambiente SIG.

Materiais e métodos

Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Pirapozinho e possui uma área aproximada de 1.000 km² (Figura 1). Está inserida na 22^a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Pontal do Paranapanema (UGRHI-22) localizada no extremo oeste do estado de São Paulo. Uma característica importante da bacia do rio Pirapozinho é a sua potencialidade de atuar no abastecimento público dos núcleos populacionais mais próximos na região do Pontal do Paranapanema.

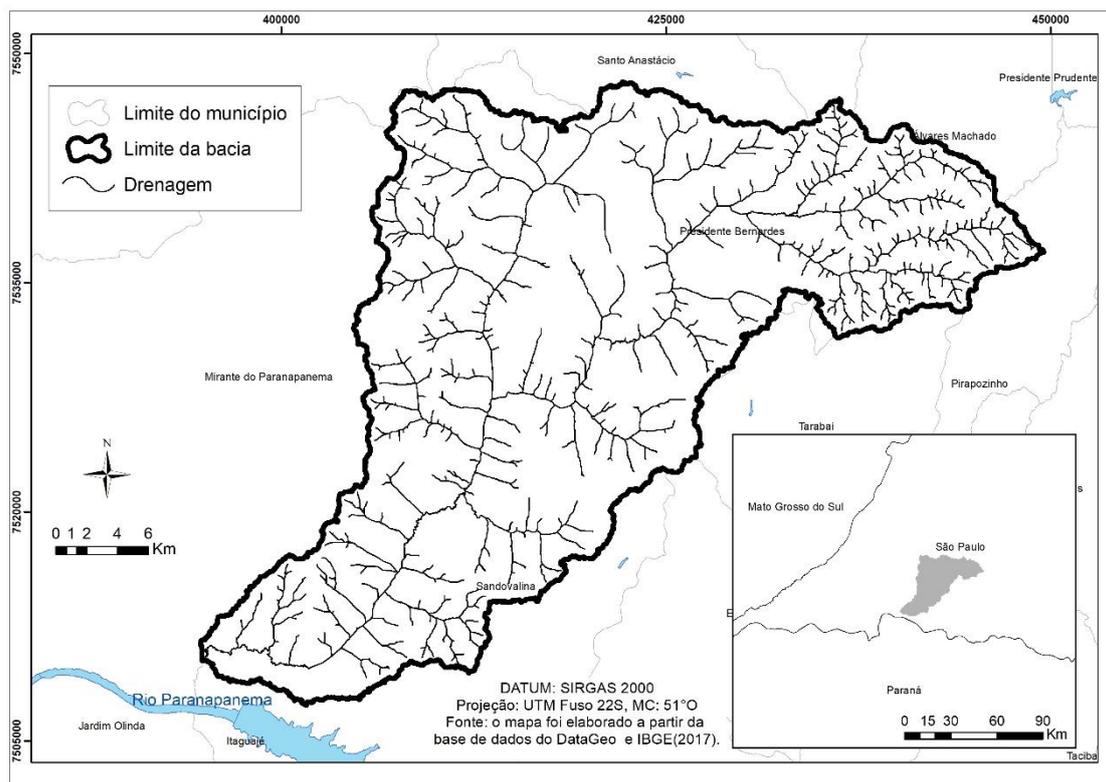


Figura 1. Área de estudo

Organização dos dados cartográficos

Os critérios utilizados para elaboração do mapa de áreas prioritárias para recuperação florestal está no apêndice deste mesmo manuscrito, e foram estabelecidos de acordo com a literatura (Valente *et al.*, 2005; Valente *et al.*, 2008; Catellani *et al.*, 2012; Sartori *et al.*, 2012; Nossack *et al.*, 2014; Vettorazzi *et al.*, 2016; Valente *et al.*, 2017; Mello *et al.*, 2018; Bianchini *et al.*, 2019). Os critérios selecionados foram:

- (1) Vulnerabilidade à erosão: está relacionado com o nível de suscetibilidade a erosão que se encontra a bacia de acordo com o manuscrito anterior. Levamos em consideração critérios como pedologia, declividade, geomorfologia, uso e cobertura da terra e densidade de drenagem.
- (2) Distância de rodovias: a redução de ecossistema é causada direta ou indiretamente pelas rodovias. Refere-se à alteração da sua estrutura e composição, além da redução da área total de um ecossistema ou sua redução parcial, criando um mosaico de fragmentos (Diniz *et al.*, 1998;

Harris, 1984; Southworth *et al.*, 2004; Turner , 1989; Vianna *et al.*, 1997; Rezzadori *et al.*, 2016).

(3) Distância de áreas urbanas: a proximidade entre áreas urbanas e fragmentos florestais pode ser desfavorável pelas perturbações como caça, desmatamento e/ou incêndios (Sartori *et al.*, 2012). Para o sucesso de uma recuperação florestal é importante a priorização de áreas distantes dessas fontes de perturbação, uma vez que a qualidade da água está negativamente relacionada à urbanização (Mello *et al.*, 2018).

(4) Fragmentos de vegetação: os córregos e as nascentes próximos a vegetação têm melhor qualidade de água do que áreas distantes desses fragmentos (Pinto *et. al.*, 2012). As taxas de extinção também estão relacionadas aos fragmentos florestais, visto que fragmentos menores estão mais suscetíveis a perda maior de espécies do que fragmentos maiores. Fragmentos menores estão mais expostos a ações externas, seja ela pelos efeitos do uso e ocupação da terra ou outra atividade antrópica (Rezzadori *et al.*, 2016). Além disso, a biodiversidade não é afetada apenas pelo tamanho das manchas de floresta, mas também pela distância entre habitats vizinhos que podem desempenhar um papel importante na conectividade entre as espécies (Poor *et al.*, 2019).

(5) Rede de drenagem: a proximidade da rede hidrográfica tem sua importância, uma vez que a mata ciliar previne a erosão do solo e conseqüentemente mantém a qualidade da água (Filoso *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2018).

Os dados cartográficos representando cada critério foram organizados em um banco de dados geográfico no referencial geodésico adotado no Brasil, que é o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), e na projeção UTM (Universal Transverso de Mercator) fuso 22 Sul.

Para delimitar a bacia do rio Pirapozinho utilizamos a ferramenta *Hidrology* no software comercial ArcGIS 10.2, usando um Modelo Digital de Superfície, de 30 m de resolução espacial, coletado na missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) da NASA (National Aeronautics and Space

Administration) em 2000. A partir disso, foi usado o limite da área da bacia como máscara de recorte para os dados cartográficos de interesse.

Para o critério “vulnerabilidade à erosão” utilizamos um mapa síntese criado em um estudo anterior, onde se encontra detalhado os métodos adotados. Os critérios utilizados foram: pedologia, geomorfologia, densidade de drenagem, declividade e uso e cobertura da terra. Foi elaborado a partir da base de dados do modelo digital de elevação SRTM (NASA, 2000), IPT (1999), IBGE (2017) e Datageo.

Para os critérios “distância de rodovia”, “distância de áreas urbanas” e “rede de drenagem” geramos mapas de distâncias por meio da ferramenta *Euclidean distance* do software ArcGIS 10.2. Elaboramos o critério “fragmento de vegetação” a partir dos dados do Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil – MapBiomas (2018) que identifica o grau de cobertura vegetal presente na área de estudo.

Para recorte do estado de São Paulo utilizamos a plataforma Google Earth Engine – GEE e o ArcGIS 10.2 para recorte da bacia. Classificamos os dados de acordo com o tamanho de seus fragmentos e separamos por classes (Tabela 1). Em seguida elaboramos mapas de distância de cada classe, definimos seus respectivos pesos e aplicamos a álgebra de mapas, gerando o mapa síntese de fragmento de vegetação.

Tabela 1 – Tamanho dos fragmentos de vegetação e seus respectivos pesos

Classe	Tamanho do fragmento	Pesos
1	Até 1 ha	0,03125
2	1 – 10 ha	0,0625
3	10 – 50 ha	0,125
4	50 – 150 ha	0,25
5	150 – 300 ha	0,5
6	Acima de 300 ha	1

Atribuição dos pesos usando o AHP

A matriz de comparação (Tabela 2) foi elaborada para definir a importância dos critérios por meio de um processo de tomada de decisão conhecido como Análise Hierárquica Analítica – AHP (Saaty, 1990). Os critérios

foram comparados (comparação pareada) tendo como referência a escala contínua de nove pontos (Figura 2) expressando a ordem de importância.

Figura 2 – Escala contínua para elaboração da matriz de comparação pareada.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremamente	Muito fortemente	Fortemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fortemente	Muito fortemente	Extremamente

Fonte: Eastman (2001).

Tabela 2 – Matriz de pesos dos critérios definidos pelo AHP.

Critérios	Vegetação	Rede de drenagem	Vulnerabilidade à erosão	Distância de rodovias	Distância de áreas urbanas	Pesos
Vegetação	1					0,494146
Rede de drenagem	1/3	1				0,282236
Vulnerabilidade à erosão	1/5	1/3	1			0,151756
Distância de rodovias	1/9	1/7	1/5	1		0,035930
Distância de áreas urbanas	1/9	1/7	1/5	1	1	0,035930

Inferência geográfica por diferentes modelos lógicos

Antes da combinação dos critérios pela álgebra de mapas, padronizamos os dados em uma escala comum de 0 e 1. Os critérios tiveram as relações de prioridade estabelecidas por meio da ferramenta *Fuzzy Membership* do software ArcGIS 10.2. Os critérios “distâncias de área urbana” e “distâncias de rodovias” foram ajustados com uma função linear crescente, ou seja, quanto mais distante maior a prioridade para reflorestar. Já os critérios “vulnerabilidade à erosão”, “distância de drenagem” e “fragmentos de vegetação” foram ajustados com uma função linear decrescente, ou seja, quanto mais próximo, maior a prioridade de reflorestar.

Elaboramos o mapa de áreas prioritárias para recuperação florestal por diferentes modelos lógicos de inferência geográfica, como Combinação Linear Ponderada (CLP) juntamente com o método AHP. Esse método aplicado por meio da multiplicação de cada mapa de critérios (isto é, cada célula, ou pixel de cada mapa) pelo seu peso e, então, somados. O método foi proposto por Voogd (1983) e seu resultado é um mapa quantitativo expressando o grau de

importância relativa por meio dos valores numéricos de saída (Câmara *et al.*, 2001).

Outro tipo de combinação de dados é baseado na inferência *Fuzzy*, que utiliza métodos lógicos para combinar dados com um conjunto de critérios, portanto, também pode ser utilizado para se obter um mapa síntese de vários planos de informação. Dentre os operadores *Fuzzy* têm-se: produto algébrico; soma algébrica e; operador Gamma.

O *produto algébrico* possui a tendência de produzir valores muito pequenos devido a multiplicação de valores menores que 1, e seus valores de pertinência *Fuzzy* de saída é a multiplicação dos valores dos pixels dos mapas de entrada referente a cada critério. A *soma algébrica* representa um operador complementar ao *produto algébrico* que causa um aumento do valor de pertinência, ou seja, o resultado é sempre um valor maior ou igual ao mais valor de pertinência *Fuzzy* de entrada (Câmara *et al.*, 2001).

O operador *Gamma* é definido pela multiplicação dos dois termos, um *produto algébrico Fuzzy* e uma *soma algébrica Fuzzy*. Este operador é expresso pela função:

$$\mu = (\text{Soma algébrica Fuzzy})^\gamma \times (\text{Produto algébrico Fuzzy})^{1-\gamma}$$

Pode-se variar a importância de cada termo (*soma algébrica* e *produto algébrico Fuzzy*) no operador *Gamma*. O grau de importância é definido por meio de atribuição de valores entre (0,1) para o expoente “ γ ”. Adotamos três variações para o “ γ ”, sendo 0,4; 0,6 e 0,8 para identificar a melhor dispersão do conjunto de pontos de cada modelo.

Resultados e discussão

Para a definição de áreas prioritárias para reflorestamento na bacia em estudo elaboramos mapas de distância (Figura 3). Cada mapa foi feito a partir dos critérios utilizados, e diante da sua importância, teve função linear crescente ou decrescente. Os critérios “distância de rodovias” e “distância de áreas urbanas” tiveram uma função linear crescente, pois quanto mais distante dessas áreas, maior seria a prioridade para o reflorestamento. Uma justificativa para isso seria a interferência antrópica, uma vez que sua relação está diretamente ligada a perturbação e redução parcial ou total de fragmentos florestais.

Os critérios “distância de drenagem”, “fragmentos de vegetação” e “vulnerabilidade a erosão” tiveram uma função linear decrescente, pois quanto mais próxima estiver dessa área, maior a prioridade para reflorestar. A importância de priorizar essas áreas não está somente relacionada a qualidade da água, mas ao equilíbrio dos ecossistemas e conservação da biodiversidade em diferentes tamanhos de fragmentos florestais.

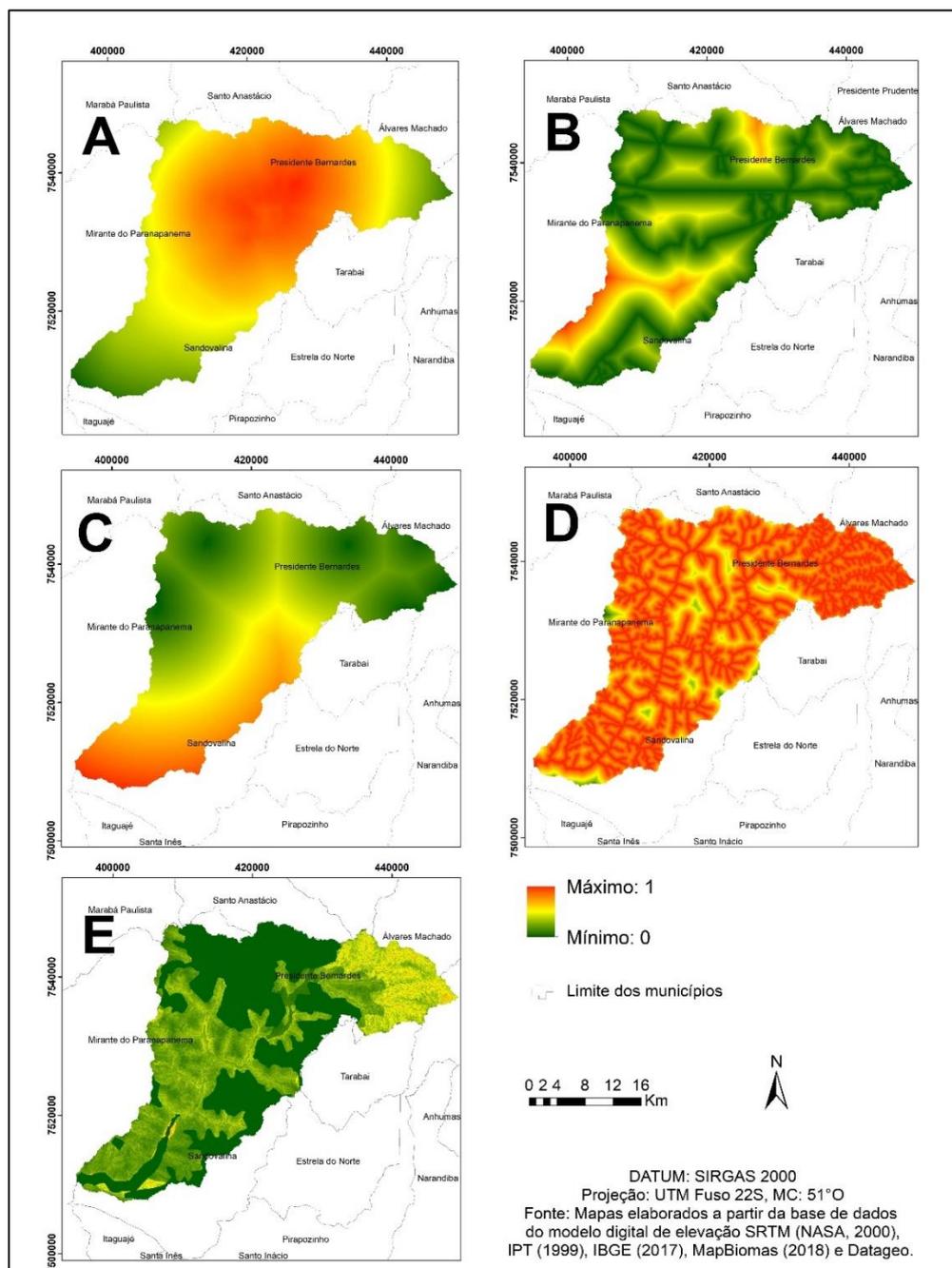


Figura 3: Mapa de distância para definição das áreas prioritárias para reflorestamento na bacia hidrográfica do rio Pirapozinho. (A) Distância entre fragmentos de vegetação; (B) Distância de rodovias; (C) Distância de áreas urbanas; (D) Distância de drenagem; (E) Distância de áreas vulneráveis a erosão.

Para cada modelo de inferência aplicado geramos um mapa (Figura 4 e 5) indicativo das áreas prioritárias para reflorestar na bacia. As áreas próximas da cor vermelha demonstram que maior prioridade de reflorestamento, já as áreas próximas da cor verde indicam menor prioridade. Por meio de uma análise visual, os produtos gerados demonstraram grandes variações entre os modelos de inferência (comparação entre Gamma 0,4 0,6 0,8 e CLP).

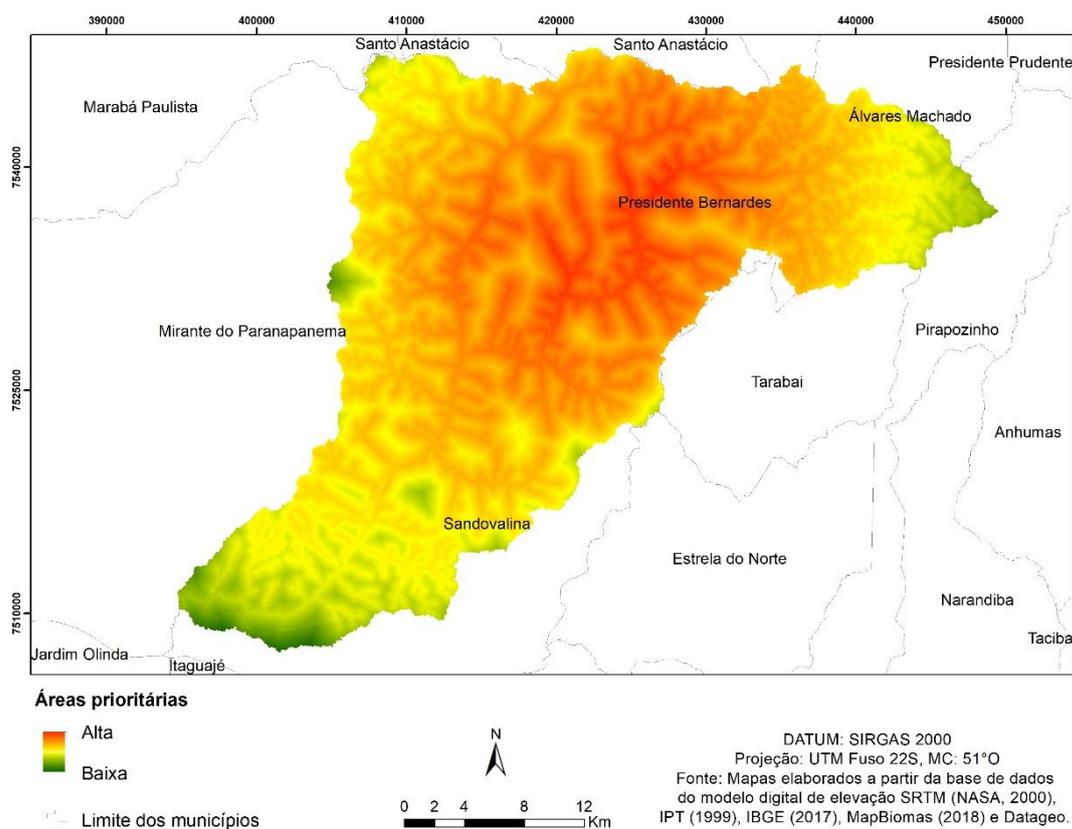


Figura 4. Mapa de áreas prioritárias para reflorestamento na bacia do rio Pirapozinho obtido pelo método CLP.

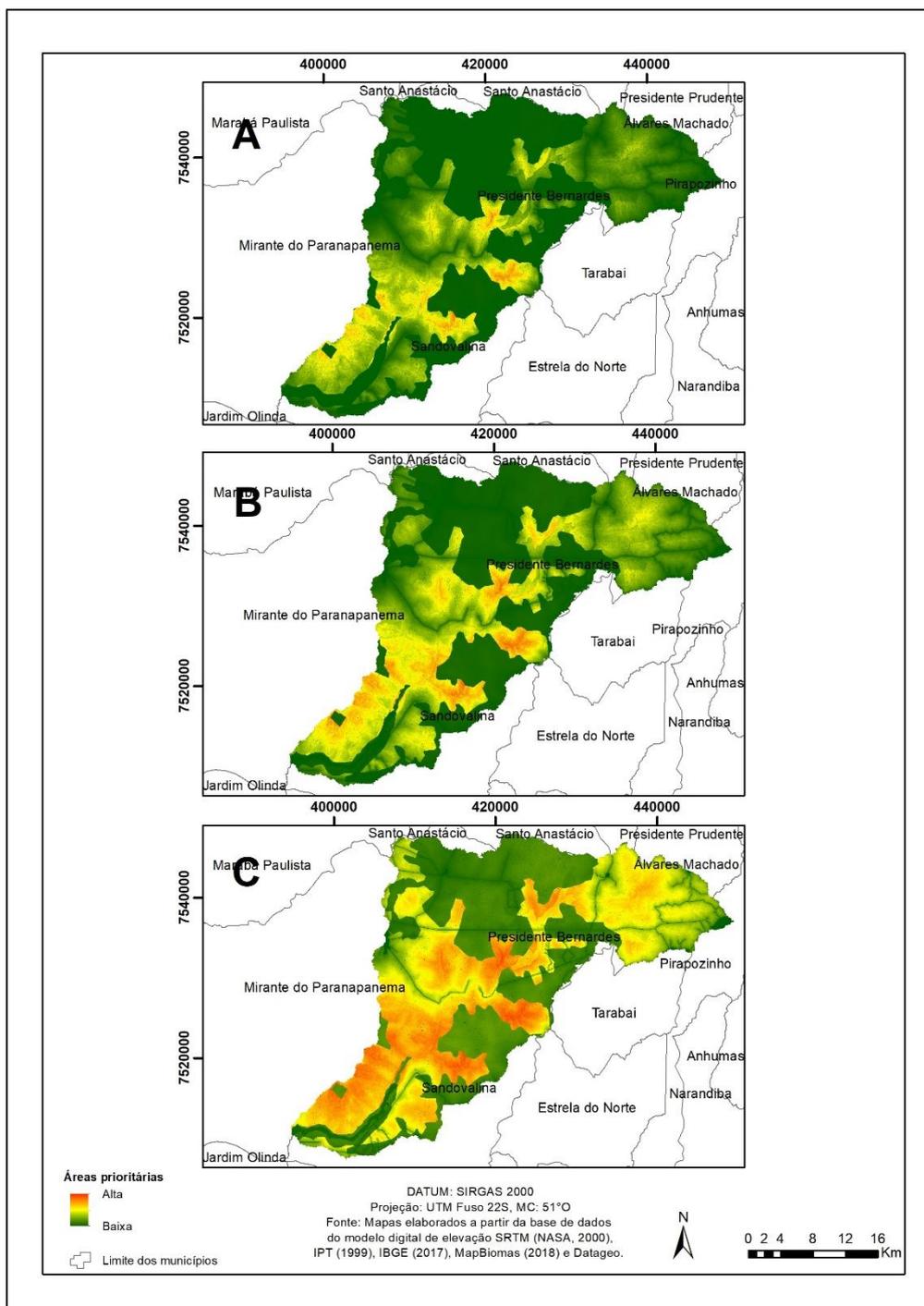


Figura 5. Mapa de áreas prioritárias para reflorestamento na bacia do rio Pirapozinho obtido por diferentes operadores gamma. (A) Fuzzy por operador gamma com expoente 0,4; (B) Fuzzy por operador gamma com expoente 0,6; (C) Fuzzy por operador gamma com expoente 0,8.

As áreas indicadas como prioritárias na Figura 4 possuem influência dos mapas de “distância de fragmentos de vegetação” e “distância de drenagem” (Figura 3). Ao observarmos a Figura 4, notamos que a área central da bacia demonstrou ter uma alta prioridade. Isso se deve a comparação pareada, pois o critério “fragmento de vegetação” teve o maior peso diante de todos os outros

critérios adotados (Tabela 2). Para suas subclasses adotamos pesos de acordo com o tamanho da área de cada fragmento (ha), ou seja, quanto maior a área do fragmento, maior o peso adotado (Tabela 1). Vale ressaltar que a região central da bacia, onde demonstra alta prioridade (Figura 4), é composta pelos fragmentos com maior área (ha) de vegetação, como podemos observar na Figura 3. Observamos também que as áreas distantes dos grandes fragmentos também foram caracterizadas como prioritárias. Isso se deve as redes de drenagem, pois se encontram em toda a extensão da bacia, receberam o segundo maior peso por meio da comparação pareada, e, portanto, isso justifica as áreas indicadas como prioritárias na Figura 4.

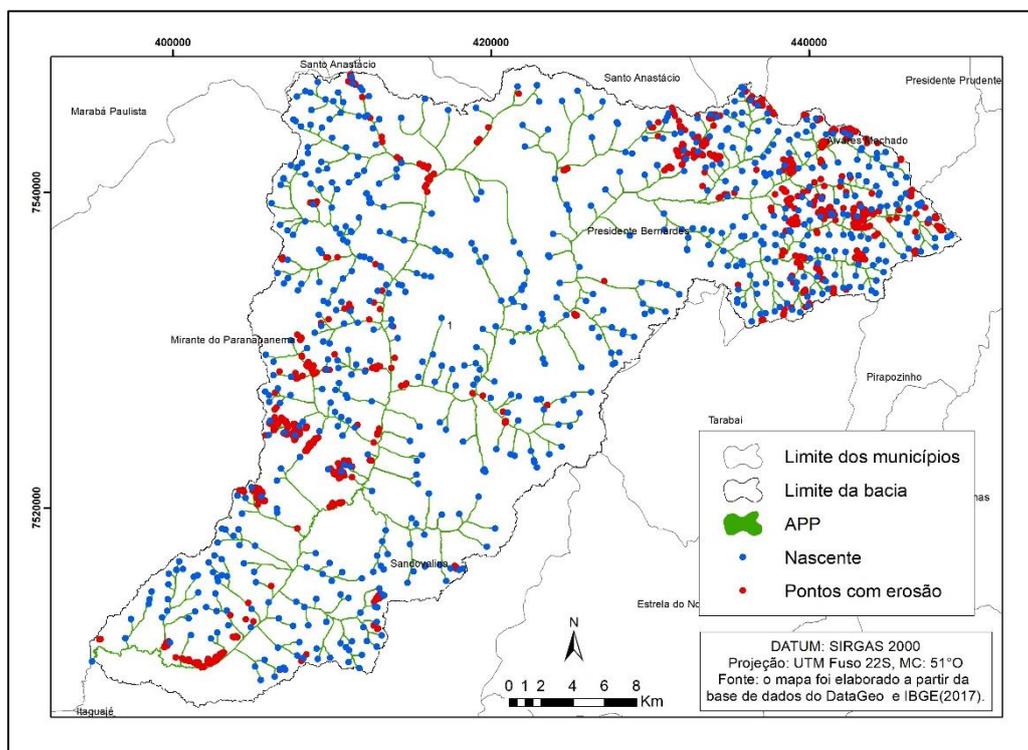


Figura 6. Áreas que devem ser prioritárias para reflorestar.

Na Figura 6 mostramos áreas que de fato precisam ser priorizadas em uma recuperação florestal na bacia em estudo, como os pontos de erosões encontrados em toda a sua extensão, áreas de nascente e APP. É importante que essas áreas estejam inclusas no planejamento de recuperação florestal de bacias, pois são fatores de extrema importância quando se pensa em conservação e preservação ambiental.

Por meio de análise visual, ao associar as áreas prioritárias encontradas nas Figuras 4 e 5 com as áreas da Figura 6, observamos que o CLP e o Gamma 0,8 possibilitaram a identificação de áreas prioritárias para recuperação florestal. No entanto, como já citado, a rede de drenagem estava presente em grande parte da bacia, e na Figura 4 como a drenagem teve o segundo maior peso na comparação pareada, conseqüentemente as áreas de nascentes, APP e os pontos de erosão foram priorizados. Vale salientar, que grande parte dos pontos de erosão estavam presentes em áreas mais baixas da bacia, ou seja, próxima às redes de drenagem, portanto em áreas indicada como prioritárias.

Assim como o CLP, o Gamma 0,8 (Figura 5) também priorizou as áreas consideradas mais importantes. No entanto, o Gamma 0,8 limitou melhor algumas áreas de priorização, e não necessariamente todo o canal da drenagem da bacia como o CLP. Por meio de análise visual, observamos que o Gamma 0,8 priorizou as áreas com maior vulnerabilidade à erosão na bacia em estudo (Figura 3), e não toda a sua extensão.

Visto que os métodos tiveram comportamentos diferentes, porém relevantes, notamos que podemos abordar o trabalho em dois cenários: o primeiro com o CLP, onde podemos dar pesos aos critérios direcionando a ordem de importância de cada um deles que determinará as áreas prioritárias da bacia. Neste caso, priorizamos os grandes fragmentos de vegetação e a rede de drenagem. No segundo cenário observamos que podemos ter uma prioridade um pouco mais restrita para áreas que consideramos mais vulneráveis do que outras. Diante disso, é importante observarmos que dependendo do tipo de planejamento ou implementação de projetos voltado a recuperação florestal, é significativo ter conhecimento das características da área e qual cenário desejará adotar.

Conclusão

Conclui-se que a análise multicritério, em ambiente SIG, é adequada para o mapeamento de áreas prioritárias à recuperação florestal em bacias hidrográficas.

Constatamos que podemos abordar dois cenários neste trabalho: o primeiro com o método CLP onde priorizamos áreas com grandes fragmentos de vegetação e alta densidade de drenagem, e o segundo com o método Gamma,

que priorizou áreas vulneráveis da bacia. O modelo de integração proposto satisfaz a identificação de áreas para a recuperação de florestas em bacias hidrográficas, e diferentes cenários podem ser construídos.

Recomendamos que trabalhos futuros utilizem outros métodos para a construção de novos cenários, e/ou abordem métodos que validem os cenários apresentados.

Referências

- Almeida, F. C.; Silveira, E. M. O.; Paiva, L. L.; Junior, F. W. A., 2019. Mapping of priority areas for forest recovery using multicriteria analysis in the brazilian atlantic forest. **RAOEGA – O espaço geográfico em análise**, v. 46, n. 03, p. 113-124.
- Arana, A. R. A.; Uliana, M. R.; Evangelista, C. R. L., 2019. Produtor familiar x Agronegócio canavieiro: impactos do cultivo da cana na produção do bicho da seda em Mirante do Paranapanema. **Geosul**, v. 34, n. 71, p. 623-639.
- Bianchini, C. D.; Oliveira, G. G., 2019. Geoprocessamento aplicado à identificação de áreas aptas para a implantação de unidades de conservação no Vale do Taquari, RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 2, p. 513-541.
- Brancalion, P. H. S.; Garcia, L. C.; Loyola, R.; Rodrigues, R. R.; Pillar, V. D.; Lewinsohn, T. M., 2016. Análise crítica da Lei de Proteção da Vegetação Nativa (2012), que substituiu o antigo Código Floresta: atualizações e ações em curso. **Natureza & Conservação** 14.
- Brasil. Lei 12.651/2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em 24 nov. 2019.
- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V., 2001. Introdução à Ciência da Geoinformação. **INPE**, São José dos Campos – SP.
- Catelani, C. S.; Batista, G. T.; Targa, M. S.; Dias, N. W., 2012. Determinação de áreas prioritárias para o restabelecimento da cobertura florestal, apoiada no uso de geotecnologias. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 113-126.
- Diniz, A.; Furlan, S. A., 1998. Relações entre as classificações fitogeográficas, fitossociologia, cartografia, escalas e modificações sócio-culturais no Parque Estadual de Campos de Jordão (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 12, p. 123-161.
- Filoso, S; Bezerra, M. O.; Weiss, K. C.; Palmer, M. A., 2017. Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. **Plos One**, v. 12, n.8.
- Fushimi, M.; Nunes, J. O. R., 2018. Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares das paisagens de parte dos municípios de Marabá Paulista (SP) e Presidente Epitácio (SP), Brasil. **Revista da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia (Anpege)** 14, p. 05-27.

- Fushimi, M.; Nunes, J. O. R.; Nakamura, R. Y.; TAKATA, L. T. O., 2013. Vulnerabilidade ambiental e aplicação de técnicas de contenção aos processos erosivos lineares em áreas rurais no município de Presidente Prudente – SP. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 14, p. 343-356.
- Gonçalves, S. R. A.; Araújo, R. R.; Imai, N. N., 2016. Mapeamento do grau de fragilidade com processo analítico hierárquico e operadores fuzzy gama na detecção áreas de fragilidade ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia** 68, p. 327-337.
- Harris, L.D., 1984. **The fragmented forest: Island biogeography theory and the preservation of biotic diversity**. Chicago: University of Chicago Press, p. 230.
- Hu, T.; Chang, J.; Liu, X.; Feng, S., 2017. Integrated methods for determining restoration priorities of coal mining subsidence areas based on green infrastructure: –A case study in the Xuzhou urban area, of China. **Ecological indicators**.
- ITESP. **Fundação Itesp: sua história e realizações, evolução das políticas agrárias e fundiária no Estado de São Paulo**. São Paulo: Itesp, 2013, p. 304.
- Kangas, J.; Store, R.; Leskinen, P.; Mehtätalo, L., 2000. Improving the quality of landscape ecological forest planning by utilizing advanced decision-support tools. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.132, p.157-171.
- Magnani, R.; Lima, E. S. O impacto da nova estação de tratamento de efluentes do município de Resende-RJ para o fortalecimento do conceito de cidade sustentável. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, Salvador, v.4, n. 1, p. 19-38, jan/jun 2018.
- Malczewski, J., 2010 Multiple Criteria Decision Analysis and Geographic Information Systems. In: GRECO, S.; EHRGOTT, M.; Figueira, J. R. Multiple Criteria Decision Analysis, 02, 369-395.
- Mello, K.; Costa, D. R.; Valente, R. A.; Vettorazzi, C. A., 2018. Multicriteria Evaluation for Protected Area Definition Aiming at Water Quality Improvement. **Floresta e Ambiente** 25.
- Mostert, E.; Gaertner, M.; Holmes, P. M.; O'Farrell, P.; Richardson, D. M., 2018. A multi-criterion approach for prioritizing areas in urban ecosystems for active restoration following invasive plant control. **Environmental Management**.
- Nossack, F. A.; Zimback, C. R L.; Silva, R. F. B.; Sartori, A. A. C., 2014. Aplicação de análise multicriterial para determinação de áreas prioritárias à recomposição florestal. **Irriga – Brazilian Journal of irrigation and drainage**, 19, 612-625.
- Nossack, F. A.; Zimback, C. R L.; Silva, R. F. B.; Sartori, A. A. C., 2014. Aplicação de análise multicriterial para determinação de áreas prioritárias à recomposição florestal. **Irriga – Brazilian Journal of irrigation and drainage**, 19, 612-625.
- Ouyang, W.; Wu, Y.; Hao, Z.; Zhang, Q.; Bu, Q.; Gao, X., 2018. **Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development** 613-614, p. 798-809.
- Pinto, L. V. A.; Roma, T. N.; Balieiro, K. R. C., 2012. Avaliação qualitativa da água de nascentes com diferentes usos do solo em seu entorno. **CERNE**, v. 18, n. 3, p. 495-505.

Poor, E. E.; Jati, V. I. M.; Imron, M. A.; Kelly, M. J., 2019. The road to deforestation: Edge effects in na endemic ecosystem in Sumatra, Indonesia. **Plos One** 14 (7).

Rezzadori, T.; Hartmann, M. T.; Hartmann, P. A., 2016. Proximidade de rodovias pode influenciar a fragmentação florestal? Um estudo de caso no norte do Rio Grande do Sul. **Biotemas**, v. 29, n. 3, p. 21-28.

Rodrigues, T.; Tommaselli, J. T. G.; Arroio Junior, P. P., 2018. Mapeamento da vulnerabilidade aos processos erosivos a partir de métodos multicriteriais: um estudo sobre as condições ambientais da bacia hidrográfica da represa da Laranja Doce, Martinópolis – SP. **Revista Formação (Online)**, v. 25, n. 45, p. 67-91.

Ross, J. L. S., 1994. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do departamento de Geografia**, 08, p. 3-74.

Saaty, Thomas L., 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, North-Holland. 48, p. 9-26.

Sartori, A. A. C.; Silva, R. F. B.; Zimback, C. R. L., 2012. Combinação linear ponderada na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais em ambiente SIG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1079-1090.

Serpa, D.; Nunes, J. P.; Santos, J.; Sampaio, E.; Jacinto, R.; Veiga, S.; Lima, J. C.; Moreira, M.; Corte-Real, J.; Keiser, J. J.; Abrantes, N., 2015. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. **Science of the Total Environment** 538, p. 64-77.

Southworth, J., Munroe, D., Nagendra, H., 2004. And cover change and landscape fragmentation— comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 101, p. 185–205.

Sun, D.; Zhang, W.; Lin, Y.; Liu, Z.; Shen, W.; Zhou, L.; Rao, X.; Liu, S.; Cai, X.; He, D. Fu, S., 2018. Soil erosion and water retention varies with plantation type and age. **Forest Ecology and Management** 422, p. 1-10.

Turner, M. G., 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on process. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 20, p. 171-197.

Uribe, D.; Geneletti, D.; Castillo, R. F.; Orsi, F., 2014. Integrating Stakeholder Preferences and GIS-Based Multicriteria Analysis to Identify Forest Landscape Restoration Priorities. **Sustainability** 6, p. 935-951.

Valente, R. A.; Petean, F. C. S.; Vettorazzi, C. A., 2017. Multicriteria decision analysis for prioritizing areas for forest restoration. **CERNE** 23, p. 53-60.

Valente, R. O. A.; Vettorazzi, C. A., 2005. Comparação entre métodos de avaliação multicriterial, em ambiente SIG, para a conservação e a preservação florestal. **Scientia Forestalis** 26, 51-61.

Valente, R. O. A.; Vettorazzi, C. A., 2008. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. **Forest Ecology and Management** 256, 1408-1417.

Vettorazzi, C. A.; Valente, R. O. A., 2016. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources. **Ecological Engineering** 94, 255-267.

Vianna, V. M., Tabanez, A. A. J & Batista, J. L. F., 1997. Dinâmica e restauração de fragmentos na floresta atlântica. In: LAURANCE, W. F. & BIERREGAARD, R. O. (Org.). **Tropical Forest Remnants Ecology, Management and Conservation of Fragmented Communities**. Chigaco and London: Univerty of Chicago Press, p. 351-365.

Wu, L.; Jiang, J.; Li, G.; Ma, X., 2018. Characteristics of pulsed runofferosion events under typical rainstorms in a small watershed on the Loess Plateau of China. **Scientific Reports** 8:3672.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho sobre o processo de definição de áreas prioritárias para reflorestamento na bacia do rio Pirapozinho, a partir de uma abordagem multicritério utilizando SIG, teve como primeiro resultado científico o manuscrito intitulado “Validação de mapa de vulnerabilidade a erosão por Aprendizagem de Máquina” submetido à Revista Brasileira de Geografia Física (RBGF).

Como segundo produto desta dissertação, tem-se o manuscrito intitulado “Definição de áreas prioritárias para a recuperação florestal em bacias hidrográficas a partir de análise multicritério”. A submissão desse manuscrito será realizada à uma revista científica de impacto na área de Ciências Ambientais, visto que é a área de concentração do PPGMADRE.

APÊNDICE

Crítérios utilizados no manuscrito 2: (A) Rodovias; (B) Áreas Urbanas; (C) Vegetação e rede de drenagem.

