

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE  
CAMPUS DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE  
RECURSOS RENOVÁVEIS

CARLA AMÉRICO

**MICROPLANEJAMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS POR MEIO  
DE GEOTECNOLOGIAS.**

Sorocaba, 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE  
CAMPUS DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE  
RECURSOS RENOVÁVEIS

CARLA AMÉRICO

**MICROPLANEJAMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS POR MEIO  
DE GEOTECNOLOGIAS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis da Universidade do Federal de São Carlos- *campus* Sorocaba, como requisito à obtenção de título de mestre, na linha de pesquisa de manejo de recursos renováveis.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> **ROBERTA AVERNA VALENTE**  
Co-orientador: Prof. Dr. **CLAUDIO ROBERTO THIERSCH**

Sorocaba, 2018

Américo, Carla

Microplanejamento de estradas florestais por meio de geotecnologias. /  
Carla Américo. -- 2018.  
48 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus  
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Roberta Avena Valente

Banca examinadora: Carlos Alberto Vettorazzi, José Mauro Santana da  
Silva

Bibliografia

1. Análise Multicriterial. 2. Combinação Linear Ponderada. 3.  
Conservação florestal. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos.  
III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979

**CARLA AMERICO**

**MICROPLANEJAMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS POR  
MEIO DE GEOTECNOLOGIAS**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação para obtenção do título de  
mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis,  
Universidade Federal de São Carlos.  
Sorocaba, 02 de maio de 2018.**

**Orientadora:**



---

**Prof. Dra. Roberta Averno Valente**  
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar *Campus Sorocaba*

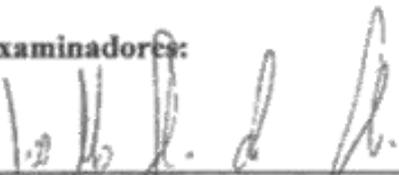
**Coorientador:**



---

**Prof. Dr. Cláudio Roberto Thiersch**  
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar *Campus Sorocaba*

**Examinadores:**



---

**Prof. Dr. José Mauro Santana da Silva**  
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar *Campus Sorocaba*



---

**Dr. Carlos Alberto Vettorazzi**  
Universidade de São Paulo – ESALQ/USP

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela força e coragem que me foram concedidas para vencer mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Reinaldo e Lucilena, pelos ensinamentos de perseverança e confiança que depositaram em mim.

A professora Roberta Valente, minha orientadora e amiga, pela confiança, compreensão, paciência, incentivo e ajuda em todos esses anos de orientação.

Aos professores Cláudio Thiersch, pela co-orientação, Emerson Arruda, José Mauro e Carolina Brandani no auxílio na condução deste trabalho.

Aos funcionários da empresa pelos dados e auxílio a mim fornecidos, em especial a Juliana Aoki, Nelson Hiramatsu, Marcos Sandro Felipe e Leandro Rodrigues.

Aos amigos Thaís Oliveira, Priscila Aiko, Indiara Saas, Rayssa Guinatto, Guilherme Caetano, André Ponciano, André Oliveira, Pablo Gonçalves e Kaline de Mello, por todo apoio, ajuda e amizade.

A Luciana Kawamura, funcionária da pós-graduação, pelo ótimo atendimento e ajuda nesses anos.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP- processo nº 2016/17117-6), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos demais amigos e familiares.

*“As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade dos autores e não necessariamente refletem a visão da FAPESP”.*

## RESUMO

AMÉRICO, Carla. Microplanejamento de estradas florestais por meio de geotecnologias. 2018. 48 f. Dissertação (Mestrado em “Planejamento e uso de recursos renováveis”) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018.

As estradas florestais, quando não são bem estruturadas e locadas, tornam-se fontes potenciais de impactos ambientais, principalmente os relacionados à dinâmica de água e produção de sedimentos. As análises ambientais subsidiam o planejamento dos diferentes usos do solo, contribuindo para o controle dos processos geodinâmicos indesejáveis, dentre os quais está o de erosão. Neste contexto, o estudo visou à definição de áreas críticas à locação de estradas florestais, considerando aspectos do relevo, da hidrografia e dos solos de uma paisagem (i.e. fazenda florestal de estudo). Esses aspectos foram mapeados, o que subsidiou a produção dos seguintes critérios: declividade, erodibilidade (K), distância ao fluxo acumulado de água e orientação de vertentes. Em seguida, foram combinados por meio do método da Combinação Linear Ponderada (CLP), de Avaliação Multicriterial (AMC), gerando o mapa final de áreas críticas à locação de estradas, que teve sua exatidão verificada por meio de uma análise ROC (Receiver Operating Characteristic). A fazenda foi classificada nos seguintes níveis de criticidade: 39,46% alta, 29,68% média, 15,61% baixa, 10,90% muito alta, 4,14% muito baixa, 0,14% extremamente baixa e 0,06% extremamente alta. Já as estradas, atualmente locadas na área, foram classificadas com os seguintes níveis de criticidade: 37,79% alta; 21,78 % média; 17,43 % baixa, 15,23% muito alta; 6,97% muito baixa, 0,43% extremamente baixa e 0,36% extremamente alta. Com a análise ROC constatou-se uma acurácia estatisticamente significativa do mapeamento, indicando que os critérios representaram as características críticas da paisagem. Concluiu-se que é possível utilizar o método da CLP no planejamento da rede viária florestal, considerando aspectos críticos da paisagem, de forma a assegurar tanto a conservação do solo quanto da água da paisagem.

**Palavras-chave:** Análise Multicriterial. Combinação Linear Ponderada. Conservação florestal.

## ABSTRACT

AMÉRICO, Carla. Forest road microplanning by means of geotechnology. 2018. 48 f. Dissertation (Master in “Planning and Use of Renewable Resources”) – Science and Technology Center of Sustainability, Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2018.

Forest roads, when are not well structured and allocated, can become potential sources of environmental impacts, mainly related to water dynamics and sediment production. The environmental analyses subsidize the land-use planning which contributes to the control of the undesirable geodynamic processes as the erosion. In this context, the study aimed at the definition of critical areas to forest roads allocation, considering relief, hydrography, and soil characteristics of a landscape (i.e. forest farm of study). We mapped these aspects, that supported the following criteria map generation: slope, erodibility, distance to the flow accumulation water, and aspect. Some criteria were aggregated through Weighted Linear Combination (WLC), a Multicriteria Method (MCE), producing the final map of critical areas to allocated roads, which had its accuracy verified by ROC (Receiver Operating Characteristic) analysis. According to the mapping, the farm was classified in the following levels of criticality: 39,46% high, 29,68% average, 15,61% low, 10,90% very high, 4,14% very low, 0,14% extremely low, and 0,06% extremely high. Yet the roads currently located in the area were classified as the following criticality levels: 37,79% high; 21,78% average; 17,43% low, 15,23% very high; 6,97% very low, 0,43% extremely low, and 0,36% extremely high. The ROC analysis showed a statistically significant accuracy of the mapping, indicating that the criteria represented the critical characteristics of the landscape. We concluded that WLC method can be used in the forest road network planning, considering the critical aspects of the landscape, ensuring its soil and water conservation.

**Keywords:** Multicriteria Analysis. Weighted Linear Combination. Forest Conservation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização, uso e cobertura do solo da fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.....	9
Figura 2- Classes de solo presentes na fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo. Fonte: BCDE (2016). ....	10
Figura 3- Amostragem de solo em campo, sendo A- trado holandês, B- coleta de solos, C- exemplo de amostra simples, D- acondicionamento da amostra composta. ....	11
Figura 4- Classes de declividade da fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo. ....	13
Figura 5- Critérios normalizados e respectivas funções de pertinência: (A) declividade, (B) erodibilidade do solo, (C) distância ao fluxo acumulado de água e (D) orientação de vertentes, da fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo. ..	16
Figura 6- Áreas de restrição (AMC) para a fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo. ....	20
Figura 7- Áreas à locação de estradas florestais, em níveis de criticidade, para fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.....	23
Figura 8- Estradas florestais classificadas em níveis de criticidade: (A) extremamente baixa; (B) muito baixa; (C) baixa; (D) média; (E) alta; (F) muito alta e (G) extremamente alta; da fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.....	24
Figura 9- Curva ROC do método da CLP, para a fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.....	25

## SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO .....	1
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
2.1.Estradas florestais .....	2
2.2.Avaliação Multicriterial .....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
3.1.Área de estudo.....	7
3.2.Caracterização dos parâmetros físicos da paisagem.....	9
3.2.1.Erodibilidade (K) .....	10
3.2.2.Declividade .....	13
3.2.3.Distância ao fluxo acumulado de água.....	14
3.2.4.Orientação de vertentes .....	14
3.3.Mapeamento de áreas críticas à locação de estradas .....	15
3.4.Normalização dos critérios.....	15
3.5.Importância dos critérios.....	17
3.6.Influência dos critérios.....	19
3.7.Restrições .....	19
3.8.Agregação dos critérios .....	20
3.9.Verificação do mapa de áreas críticas à locação de estradas florestais .....	21
4.RESULTADOS .....	23
5.DISSCUSSÃO .....	25
6.CONCLUSÕES .....	28
REFERÊNCIAS .....	29



## 1. INTRODUÇÃO

No setor florestal a rede viária serve como base para as atividades, viabilizando o tráfego de mão-de-obra e os meios de produção necessários para implantação, proteção, colheita e transporte dos produtos florestais (Oliveira et al., 2010).

As estradas não pavimentadas, em grande parte das vezes, são construídas sem um projeto geométrico de engenharia rodoviária, de dimensionamento transversal ou do sistema de drenagem. Essas, normalmente, possuem como pista de rolamento o solo do próprio local, podendo eventualmente ter recebido revestimento primário (Oliveira et al., 2011), cuja qualidade depende do tipo de solo.

A abertura de estradas pode causar danos na estrutura dos solos e no comportamento hidrológico local, o que torna essas vias, vulneráveis a impactos ecológicos negativos. Hoje em dia, as estradas de uso florestal têm sido motivo crescente de preocupação nas áreas de planejamento das empresas, não somente em relação ao seu custo de manutenção, sobretudo nos custos sobre o transporte.

Para Eker e Aydin (2014) as estradas florestais são estruturas complexas que requerem métodos de construção adequados, além de manutenções regulares. Caliskan (2013) aponta as estradas como uma das estruturas de maior custo do manejo florestal. Portanto, quanto melhor forem as condições da superfície dessas estradas, menor será o custo operacional do transporte.

As estradas em condições inadequadas, combinada com a periodicidade de uso e tráfego de máquinas pesadas, seja durante as atividades de plantio, de colheita ou transporte florestal, fazem com que impactos ecológicos como, por exemplo, os processos erosivos, sejam potencializados, principalmente em períodos chuvosos. Segundo Abdi et al. (2012) um sistema de estradas bem planejado, projetado, construído e com manutenção adequada, é essencial para facilitar o manejo florestal e a proteção dos recursos naturais.

Avaliando os problemas relacionados à locação e manutenção na rede viária florestal necessita-se, assim, considerar conjuntamente os aspectos físicos da paisagem (i.e. solo, água e relevo) e os relacionados às condições das estradas, que são a manutenção dos trechos e sua disponibilidade para tráfego durante o ano. Com esta

prévia avaliação é possível evitar impactos ambientais, tais como erosões e acúmulos de água e assim promover tanto a conservação do solo quanto da água da paisagem.

Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo principal definir áreas críticas à locação de estradas, por meio de método de Avaliação Multicriterial (AMC), considerando aspectos do relevo, da hidrografia e dos solos de uma paisagem.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para a espacialização das áreas críticas à locação de estradas florestais, necessita-se da integração de vários fatores abióticos, ou seja, de diferentes critérios ambientais. Dentre os diferentes métodos que se podem utilizar, para a integração desses critérios, tem-se a AMC. Essa abordagem permite agregar critérios, que podem ser representados de forma contínua e, ainda, considerar a sua importância e influência no processo de agregação.

### **2.1. Estradas florestais**

A rede viária florestal pode ser composta por diferentes tipos de estradas que variam em função das características de tráfego, associado aos parâmetros técnicos que possuem, podendo obter várias classificações. Segundo autores como Malinovski et al. (2004) e Machado (2013) elas são tradicionalmente classificadas em estradas primárias, secundárias e trilhas, sendo essas últimas também nomeadas de ramais ou caminhos de máquinas.

As estradas primárias conectam o centro consumidor à área de produção, sendo consideradas as mais importantes e, devendo apresentar trafegabilidade durante todo o ano. As secundárias, por outro lado, são aquelas que devem permitir trafegabilidade até as primárias, podendo não estar disponíveis em certos períodos do ano. Já as trilhas caracterizam-se por serem abertas dentro dos talhões e por serem utilizadas somente por máquinas florestais, sazonalmente.

Uma rede viária florestal tem por objetivo, assim, fornecer acesso a diferentes partes de uma floresta para atividades de gerenciamento, como proteção contra incêndio, controle de pragas, plantio e operações de exploração madeireira.

As estradas florestais também apresentam, no entanto, aspectos prejudiciais para as atividades florestais (Larsen e Parks, 1997; Jaafari et al., 2014; Jaafari et al., 2015). Neste contexto, a construção de uma estrada florestal deve considerar, também, os

impactos ambientais negativos, os quais incluem especificamente a destruição da drenagem natural, a degradação do solo, aumento de sedimentos nos rios (Egan et al., 1985; FAO, 1992; Eskandari e Hosseini, 2013), perda direta de habitat (pela conversão da cobertura original em uma superfície artificial) (Geneletti, 2003; Caliskan, 2013) e desequilíbrio do microclima.

A abertura de estradas florestais pode, ainda, resultar em um impacto ambiental para os ecossistemas adjacentes, devido ao movimento de terra e outras atividades que podem acabar perturbando bacias hidrográficas inteiras (Demir et al., 2007; Caliskan, 2013). Deste modo, a construção de estradas florestais deve ser projetada e executada com base em aspectos econômicos, ambientais e sociais (Ozturk e Inan, 2010; Aricak, 2015).

Sabe-se que as estradas florestais podem causar muitos impactos locais nas propriedades do solo, aumentando a erosão superficial do solo, após fortes tempestades ou períodos prolongados de chuva (Gresswell et al., 1979; Sidle et al., 1985; Wemple et al., 1996; Ziegler e Giambelluca, 1997; Larsen and Parks, 1997; Gucinski et al., 2001; LaMarche e Lettenmaier, 2001; Jordán-López et al., 2009), sobretudo, aumentando o escoamento superficial (Froehlich, 1995 ; Ziegler et al., 2000).

A erosão superficial varia de acordo com as características da superfície da estrada, incluindo a textura do solo (Luce e Black, 1999), uso do solo (Luce e Black, 1999; Ziegler et al., 2000) e tempo desde a construção ou manutenção (Luce e Black, 2001; Ramos-Scharrón e MacDonald, 2005; Stafford, 2011). O tráfego é um fator que influencia a produção de sedimentos rodoviários (Coker et al., 1993; Reid e Dunne, 1984; Van Meerveld et al., 2014; Sosa-Pérez e MacDonald, 2017), visto que causa o aumento do fornecimento de material fino, por meio da abrasão e esmagamento do solo da superfície da estrada (Sheridan et al., 2006; Sosa-Pérez e MacDonald, 2017).

Já a degradação do pavimento, de acordo com Akgul et al. (2017) pode ser afetada por fatores meteorológicos, pela carga útil do tráfego, por falta de manutenção, entre outros fatores.

Segundo Akgul et al. (2017) pode-se citar a colheita como sendo a principal atividade na utilização das estradas florestais. Durante essa atividade, diferentes veículos pesados operam nas estradas para transportar a madeira extraída, estando os impactos relacionados com a densidade de transporte e os tipos de veículos que transitam pela rede viária.

A produção e a formação de sedimentos, a partir de estradas florestais não pavimentadas, é uma preocupação ambiental relevante devido aos efeitos potenciais sobre os recursos hídricos, em especial sobre suas características físicas como turbidez e a presença de sólidos suspensos totais (MacDonald e Stednick, 2003; Motha et al., 2003; Goode et al., 2012; Sosa-Pérez e MacDonald, 2017).

De acordo com Parsakhoo et al. (2016) a redução da estabilidade agregada e o aumento da erodibilidade do solo (fator K) são citados como fatores-chave para a erosão do solo de estradas florestais. O significado da erodibilidade do solo, também conhecido como fator K, é diferente de erosão do solo. Segundo Wischmeier e Mannering (1969), é uma propriedade inerente ao solo, sendo um importante fator na previsão das perdas de terra por erosão. Ainda segundo aqueles autores, trata-se de uma propriedade complexa que depende da combinação de parâmetros individuais de cada solo, especialmente aqueles que determinam a velocidade de infiltração da água no perfil, aqueles que determinam a resistência à dispersão e ao arraste de partículas durante a chuva e, ainda, o escoamento superficial.

A intensidade de erosão de uma área qualquer pode ser mais influenciada pelos fatores declive, características das chuvas, cobertura vegetal e manejo do solo do que pelas propriedades do solo. Dessa maneira, podem-se ter alguns solos mais erodíveis que outros, mesmo quando o declive, a precipitação, a cobertura vegetal e as práticas de conservação são as mesmas.

Pode-se citar a quantidade de escoamento da superfície na estrada como um controle importante na erosão superficial (MacDonald et al., 1997; Sosa-Pérez e MacDonald, 2017).

Reconheceu-se há muito tempo que as estradas florestais, especialmente em terrenos íngremes e montanhosos, podem resultar em impactos adversos no meio ambiente por meio da aceleração da erosão, do carregamento de sedimentos e perturbação das características de drenagem das bacias hidrográficas (Megahan, 1987; Furniss et al., 1991; Ziegler et al., 2000; Jaafari et al., 2014).

A severidade dos impactos como erosão e escoamento superficial está relacionada ao gradiente da inclinação do terreno (Dyrness, 1965; Qinsen e Shuren, 1994; Safari et al., 2016). A declividade influencia fortemente os processos de erosão, principalmente a erosão hídrica do solo, uma vez que seu aumento promove o aumento no volume e na velocidade da enxurrada e, diminui a infiltração de água no solo (Cogo et al., 2003; Gonçalves et al., 2011; Kateb et al., 2013). Assim, quanto maior a

declividade do terreno, mais expressiva pode ser a contribuição das estradas florestais para a ocorrência da erosão (Eker e Aydin, 2014). Além disso, o tipo de solo e intensidade do fluxo de água são alguns dos fatores que influenciam a erosão hídrica, de acordo com Martins et al. (2014).

Segundo Reinert e Reinchert (2006), a umidade presente no solo pode ser caracterizada como uma medida da quantidade de água em estado líquido ou gasoso, presente no espaço poroso do solo em um dado instante. Ela também vem sendo citada como uma característica relacionada a importantes processos hidrológicos, tais como a taxa de infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração (Su et al., 2014; Santos et al., 2016).

A heterogeneidade topográfica causa diferentes gradientes em altitude, que influenciam a radiação solar que o solo recebe e conseqüentemente sua umidade. Considerando as estradas florestais, de acordo com Keller e Sherar (2003) é importante manter o solo com uma drenagem eficiente, evitando assim o acúmulo de umidade.

Por conseguinte, de acordo com o estudo de Meignan et al. (2015), o tipo de solo, drenagem e declive são considerados critérios importantes para determinar a viabilidade das estradas, custos de construção e de manutenção.

Uma maneira comum de reduzir os impactos ambientais causados por estradas, é remover ou desativar uma estrada que não é mais necessária ou desejável (Switalski et al., 2004; Weaver et al., 2015; Sosa-Pérez e MacDonald, 2017), ou ainda, realizar sua locação. As decisões sobre a construção, manutenção e locação de estradas fazem, dessa forma, parte de um processo de planejamento operacional. Portanto, é importante considerar conjuntamente os parâmetros da paisagem para que seja possível evitar os impactos negativos nas estradas florestais, não somente levando em consideração a eficiência dos custos no transporte, mas, sobretudo o manejo sustentável do ambiente florestal.

## **2.2. Avaliação Multicriterial**

A Avaliação Multicriterial (AMC), de acordo com Malczewski (2010), pode ser pensada como um processo que combina e transforma dados espaciais e não espaciais (dados de entrada) em uma decisão final (resultados). Ela é um procedimento (regra de

decisão) que define a relação entre os mapas de entrada e final. Para Malczewski (2004) a AMC envolve a utilização de informações referenciadas, as preferências dos tomadores de decisão e, ainda, a manipulação destas informações e preferências de acordo com uma regra específica.

As preferências dos tomadores de decisão equivalem aos critérios, parâmetros que devem ser agregados e, que na maioria das situações, apresentam diferentes unidades.

De acordo com Malczewski e Rinner (2015), a AMC tem sido amplamente aplicada para análises de decisões e situações de gerenciamento em uma variedade de domínios de aplicação.

Entre os autores que utilizaram a espacialização por meio da AMC em estudos ambientais com o objetivo de priorizar áreas para a conservação dos recursos naturais e restauração da paisagem podem ser citados: Valente e Vettorazzi, (2008); Francisco et al., (2008); Silveira et al., (2014); Vettorazzi e Valente, (2016); Valente et al., (2017); Silva et al., (2017).

Malczewski e Rinner (2015) destacam o método da Combinação Linear Ponderada (CLP), como o método de AMC mais frequentemente empregado nos trabalhos científicos, em diferentes campos de atuação.

A CLP foi desenvolvida por Voogd (1983), sendo que os parâmetros que devem ser agregados para gerar um mapa de áreas críticas, prioritárias ou vulneráveis, são denominados de fatores (Vettorazzi e Valente, 2016). Eles irão realçar ou diminuir a suscetibilidade de uma alternativa específica para uma atividade ou objetivo (Eastman, 2012). Para Randhir et al. (2001) os fatores utilizados no processo de tomada de decisão são aqueles que representam as características críticas de um habitat.

Neste método um segundo grupo de parâmetros pode ser considerado, que são as restrições. Elas são entendidas como categorias restritivas das alternativas (fatores), excluindo áreas e limitando espacialmente a distribuição das possibilidades de escolha (Eastman, 2012).

Neste estudo, a AMC foi escolhida por sua capacidade de agregar diferentes características da paisagem (expressas em unidades distintas) de forma conjunta e, por permitir associar a importância que os parâmetros têm para o objetivo do trabalho, no próprio momento de aplicação do método. Esta última característica também foi destacada por Malczewski e Rinner (2015). Eastman (2012) e Lu et al. (2018)

ressaltaram que a CLP permite que os critérios sejam ponderados diferencialmente com capacidade total de compensação.

A CLP está disponível como uma rotina em diferentes Sistemas de Informação Geográfica (SIG), mas também pode ser implementada por meio da calculadora SIG, propondo soluções adequadas para os problemas estudados. Relacionado às estradas florestais são citados poucos estudos, sobretudo, no que se refere à sua locação. Pode-se citar os autores Çalişkan (2013) e Tampekis et al. (2015), que utilizam métodos de AMC com o objetivo de planejar a rede viária florestal, levando em consideração as consequências ecológicas que sua construção pode causar.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Área de estudo**

A área de estudo foi uma fazenda de produção de madeira, conhecida como “Santa Terezinha”, localizada na região Centro-Sul do estado de São Paulo, no município de Bofete. A fazenda está a aproximadamente 10 km do centro urbano do município. Sua área é 3909,12 ha, sendo ocupada predominantemente por plantios de eucaliptos, destinada ao abastecimento da indústria de painéis.

A altitude média do município, de acordo com Alvares et al. (2013) é de 617 m. Na fazenda Santa Terezinha, a variação de altitude está entre 483 m e 647 m. O clima predominante, segundo o sistema Köppen (1948), é do tipo Cwa, o qual é caracterizado como subtropical de altitude com chuvas no verão e seca no inverno. O município possui uma média de chuva anual igual a 1490.6 mm e as temperaturas variam em média entre 17.7° e 24.5° C. (CEPAGRI,2018)

De acordo com o levantamento de tipo de solo, realizado pela empresa, a fazenda tem sua área ocupada em 47,47% por Argissolo, 7,75% por Latossolo, 7,24% por Neossolo e 37,54% da área apresenta unidade de mapeamento heterogênea sendo composta pelos tipos de solos Cambissolo, Neossolo e Argissolo.

Os usos predominantes na fazenda são os plantios de eucaliptos que ocupam 56,79% da área total. A vegetação nativa ocupa 27,64%, seguida pela Área de Preservação Permanente, que corresponde a 8,48% (Figura 1).

A área experimental ocupa 1,04%, estoque de campo corresponde a 0,81% da área, seguidas de rede elétrica 0,43%, viveiro 0,27%, sede 0,11%, plantio de pinus

0,04%, pasto 0,02 %, lagoa e lago 0,01% estradas 0,47%. Os aceiros e carregadores que representam as estradas de uso florestal dentro da fazenda correspondem a 3,93% da área total de estudo, o que equivale a 153,66 ha.

O mapa de uso e cobertura do solo da fazenda, o qual integra a base de dados cartográfica da empresa (BDCE), foi cedido para o desenvolvimento do projeto, tendo sido produzido por meio de receptor GPS geodésico (precisão nominal de 12mm), em dezembro de 2016, tendo as classes descritas a seguir:

- (a) Plantios de eucalipto: áreas ocupadas por plantios comerciais de eucaliptos;
- (b) Plantios de pinus: áreas ocupadas por plantios de pinus não-comercial;
- (c) Pastagem: áreas cobertas por gramíneas, contudo sem uso definido;
- (d) Estoque de campo: áreas com toras de eucalipto baldeadas das áreas de plantio pós- corte;
- (e) Área de Preservação Permanente (APP): área protegida, coberta por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos;
- (f) Vegetação Nativa: áreas compostas por vegetação secundária, mas não sendo classificadas como Área de Preservação Permanente nem Reserva Legal;
- (g) Área experimental: área destinada para fins de pesquisa;
- (h) Lago e lagoa: áreas com corpo de água;
- (i) Rede Elétrica: linha de distribuição de energia elétrica;
- (j) Sede: área com escritórios administrativos da empresa;
- (k) Viveiro: área destinada para produção de mudas;
- (l) Aceiros/carregadores: áreas abertas em volta dos plantios com objetivo de conter incêndios/ Carreador: caminhos por onde passam máquinas nos plantios florestais;
- (m) Estradas: caminho para circulação de veículos e pessoas de uso municipal.

Para verificar se o mapa representava a realidade terrestre houve uma verificação de campo em 120 pontos, apresentando uma exatidão de 100%. São exemplificados a seguir quatro pontos, dos quais se observou que as estradas e os plantios representavam o uso e cobertura do solo do mapa temático.

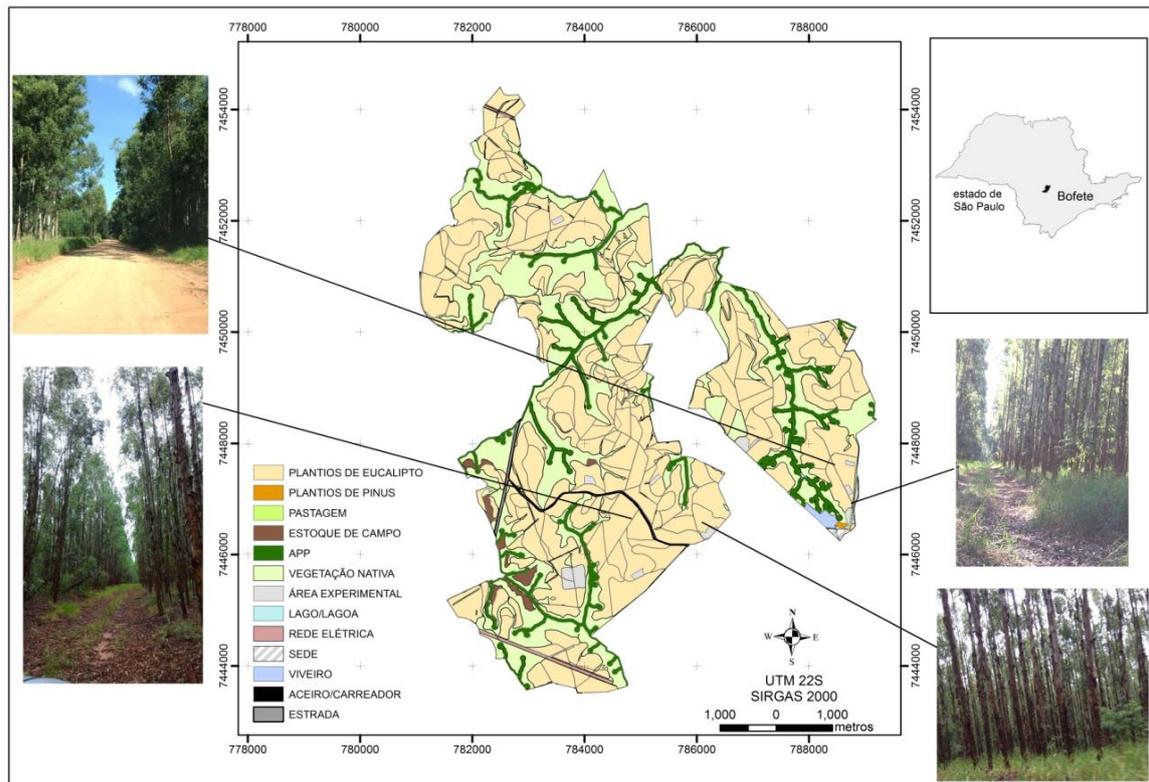


Figura 1- Localização, uso e cobertura do solo da fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.

Fonte: BDCE (2016).

### 3.2. Caracterização dos parâmetros físicos da paisagem

Os parâmetros físicos da paisagem são aqui nomeados de critérios, em função de sua agregação por meio de método AMC. Eles foram estabelecidos por meio de literatura e consulta a doze profissionais em especial, das áreas de solos e estradas florestais, dos quais oito responderam. A consulta foi realizada para que os profissionais pudessem contribuir com o estudo, sugerindo critérios importantes para o objetivo da pesquisa.

Houve, desta forma, a definição de critérios que representassem o solo, o relevo e a hidrografia da paisagem, sendo eles a erodibilidade (fator K), a declividade, a distância ao fluxo acumulado de água e orientação de vertentes, também comumente nomeado de aspecto.

Produziram-se os mapas de critérios, como descritos nos itens 3.2.1. a 3.2.4, sendo gerados a partir de planos de informações (PI) que pertenciam ao BDCE. Os PIs foram padronizados para o datum, o sistema de coordenadas e resolução do banco de

dados cartográfico desse projeto, que são respectivamente, o SIRGAS 2000, UTM (22S) e 5m.

### 3.2.1. Erodibilidade (K)

O fator K foi produzido a partir do mapa de solos da área de estudo que, por sua vez, foi elaborado na escala de 1:20 000 no ano de 2004 e fazia parte do BDCE (Figura 2). Nesse mapa, 27,88% não foi caracterizado por se tratar de Área de Preservação Permanente (APP) e Vegetação Nativa. Como nessas áreas não haverá a alteração da cobertura e não se podem local estradas, foi possível utilizar este mapa para o cálculo de erodibilidade da fazenda.

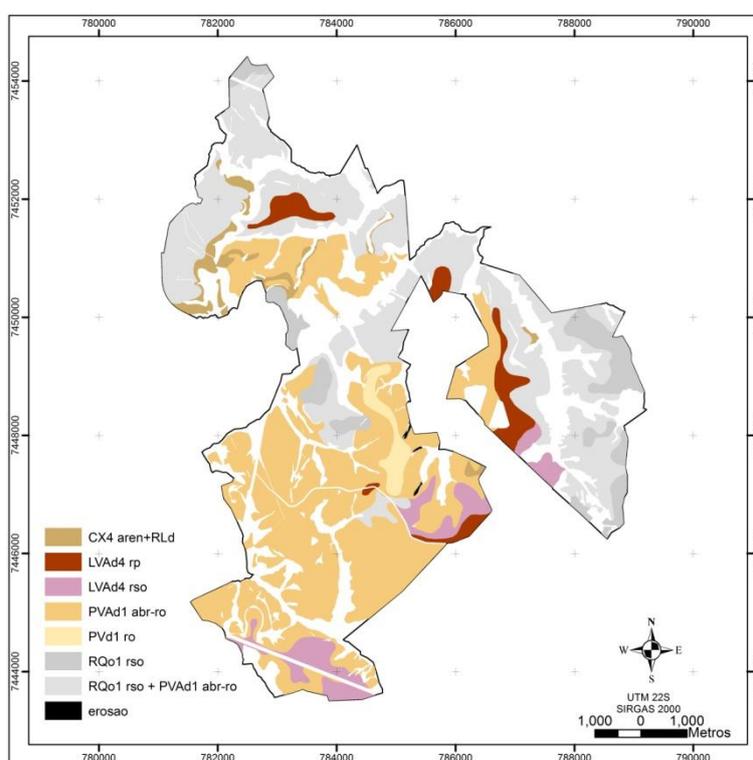


Figura 2- Classes de solo presentes na fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo. Fonte: BCDE (2016).

Sendo: CX4 aren + RLd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico, A moderado, álico, textura média. + Neossolo Litólico Distrófico típico, A moderado, álico, textura arenosa, substrato arenito Pirambóia, ambos ro a rf; LVAd4 rp- Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, A moderado, álico, textura média, rp; LVAd4 rso- Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, A moderado, álico, textura média, rs; PVAd1 abr-ro- Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto ou não, A moderado, álico, textura arenosa/ média, ro a rs; PVd1 ro- Argissolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, álico, textura arenosa/média, ro; RQo1 rso- Neossolo Quartzarênico Órtico típico, A fraco, rso e RQo1 rso + PVAd1 abr-ro- Neossolo Quartzarênico Órtico típico, A fraco, álico, rso. + Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto ou não, A moderado, álico, textura arenosa/ média, ro.arenosa/média, ro.

A partir do mapa de solos, determinou-se uma malha amostral de pontos para coleta em cada classe, distribuídos de forma uniforme pela área de estudo, onde cada área homogênea representou um tipo de solo.

A coleta foi realizada em zigue-zague aleatoriamente em 15 pontos para cada área homogênea, de acordo com o método convencional de amostragem de solo. As amostras foram coletadas com trado holandês (Figura 3A e B) a profundidades de 0-20 cm, 20 cm-40 cm e 40 cm-60 cm.

Para cada tipo de solo obtiveram-se 15 amostras, chamadas de amostras simples (Figura 3C), as quais foram acondicionadas em um recipiente (Figura 3D) e homogeneizadas, formando assim uma amostra composta.

De cada amostra composta, sendo sete tipos de solos por profundidade, foram retiradas triplicatas de 300 gramas cada, as quais foram enviadas para análise de solo, totalizando 21 amostras por profundidade.



Figura 3- Amostragem de solo em campo, sendo A- trado holandês, B- coleta de solos, C- exemplo de amostra simples, D- acondicionamento da amostra composta.

As amostras foram enviadas ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), para a realização de análise granulométrica, com o método da Pipeta. Neste método, os tamanhos das partículas consideradas foram de menor de 0,002 mm para argila, de 0,053-0,002 mm para silte e de 2,00-0,053 mm para areia total.

Para o cálculo do valor do fator K, utilizou-se a equação (eq.1) proposta por Bouyoucos (1935), cujas variáveis são seus teores de areia, silte e argila:

$$\text{Fator K} = \frac{\frac{(\% \text{areia} + \% \text{silte})}{\% \text{argila}}}{100} \quad \text{eq. 1}$$

Sendo:

K = erodibilidade de determinado horizonte do solo (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1); % Areia, % Silte e % Argila = porcentagens das respectivas frações para cada horizonte.

Os valores de erodibilidade calculados para cada classe de solo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Valores do fator K (erodibilidade) em diferentes profundidades.

Classes de Solo	Valores de erodibilidade (t.ha.h.ha-1 .MJ-1 .mm-1 )		
	0-20cm	20-40cm	40-60cm
LVA4 rp	0,0696	0,0654	0,0498
LVA4 rso	0,0801	0,0724	0,0555
PVd1 ro	0,0626	0,0509	0,0390
PVA41 abr-ro	0,2190	0,1348	0,1100
CX4 aren + Rld	0,0588	0,0475	0,0376
RQo1rso	0,0999	0,0772	0,0456
RQo1 + PVA41 abr-ro	0,1707	0,1137	0,1193

A partir do mapa de solos (BDCE) e com os valores de K calculados para cada uma de suas classes, foi realizada uma associação, dentro do ambiente SIG, considerando os valores de K na profundidade 20cm-40cm. A justificativa de se considerar somente essa profundidade na composição do mapa de erodibilidade, está no fato de se ter observado solos com gradiente textural, ou seja, acréscimo de argila na profundidade 20cm-40cm, correspondente ao horizonte B na maioria dos tipos de solos.

Solos com gradiente textural estão mais propensos à erosão, pois a água rapidamente se infiltra no horizonte A, mas é barrada por uma menor taxa de percolação no horizonte B, devido à presença de argila que contribui para a resistência do solo (Le Bissonnais, 1996; Imhoff et al., 2002; Wu et al., 2017). Assim, ela passa a se acumular no horizonte A, pois a água escoar sobre a camada compactada, erodindo o subsolo e provocando o colapso do horizonte superficial.

### 3.2.2. Declividade

O critério declividade foi gerado a partir do Modelo Numérico do Terreno (MNT), o qual foi previamente elaborado por meio da interpolação das curvas de nível (isolinhas de altimetria) digitalizadas, em ambiente SIG, a partir da carta do IGC (escala 1:10 000, ano de 1971), com equidistância de 5 metros.

Quando um MNT é gerado, alguns pixels podem apresentar um valor muito diferente dos seus vizinhos, causados pela alta elevação local. Para corrigir essa possível imperfeição dos métodos de interpolação, utilizou-se uma ferramenta, no ambiente SIG, para preenchimento de depressões. Assim, essas depressões foram preenchidas pela média das cotas dos pixels vizinhos, gerando um MNT mais consistente.

O MNT corrigido subsidiou, assim, a produção do critério declividade (Figura 4), como também dos critérios distância ao fluxo acumulado de água e orientação de vertentes.

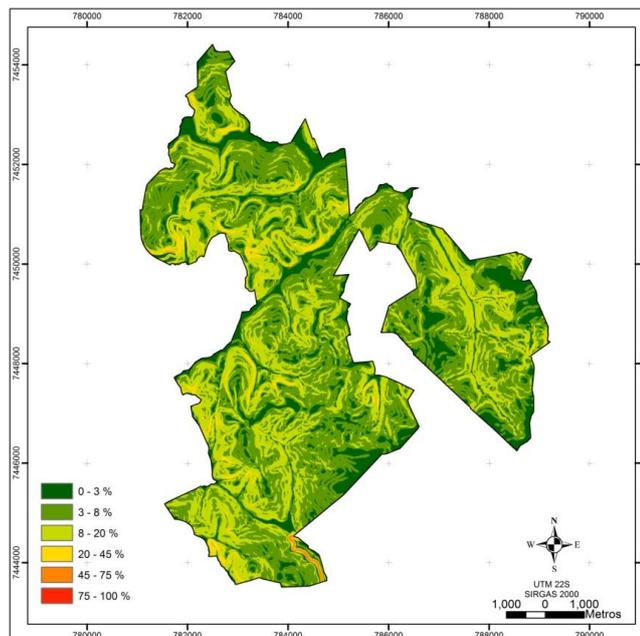


Figura 4- Classes de declividade da fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.

O mapa de declividade foi reclassificado, segundo as classes propostas pela Embrapa (2006), como apresentado na Tabela 2. A variação de declividade da área de estudo é de aproximadamente 65%, o que indica a ausência de classificação Forte montanhoso.

Tabela 2- Classificação do relevo de acordo com as classes de declividade.

<b>Declividade (%)</b>	<b>Discriminação do relevo</b>
0 – 3	Plano
3 – 8	Suave ondulado
8 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte ondulado
45 – 75	Montanhoso
75 – 100	Forte montanhoso

Fonte: Embrapa (2006).

### **3.2.3. Distância ao fluxo acumulado de água**

Os planos de informações básicos para sua geração foram a rede hidrográfica e o MNT. Primeiro, foi necessário gerar a direção do fluxo a partir do MNT. Segundo Rennó et al. (2008), a direção do fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica. A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir (Sobrinho et al., 2010). Determinar a direção do fluxo para cada pixel do MNT é um passo crucial para a caracterização de padrões do terreno (Zhang et al., 2017).

A partir da direção do fluxo, gerou-se o fluxo acumulado de água, utilizando o método “D8” criado por O’Callaghan e Mark (1984). Assim, esse método atribui o sentido do escoamento de um pixel para um de seus oito vizinhos, com base na diferença de cota ponderada pela distância entre eles. Como resultado, a cada pixel é atribuído um número indicativo de uma das oito direções de fluxo possíveis. A partir do fluxo acumulado é possível determinar onde, no terreno, haverá um maior acúmulo de água.

Após o fluxo acumulado de água ter sido gerado, as drenagens foram extraídas por meio da calculadora (de imagens), no próprio ambiente SIG. Com a extração do fluxo acumulado calculou-se a distância, levando em consideração a topografia e fatores horizontais, ou seja, considerando fatores limitantes para obter a distância de um fluxo ao outro.

### **3.2.4. Orientação de vertentes**

A orientação de vertentes, também chamada de aspecto ou face de exposição ao sol, é uma medida do ângulo horizontal da direção esperada do escoamento superficial, geralmente expressa em azimute, isto é, em relação ao Norte Geográfico (Florenzano,

2008). Este mapa contém ângulos que representam o direcionamento das faces contendo uma orientação que varia de 0 a 360 graus.

De acordo com Florenzano (2008) a orientação de vertentes do terreno é determinada por meio do grau de insolação, devido ao movimento aparente do Sol durante o dia. Desta forma, com esse critério é possível identificar as faces mais úmidas da área de estudo. Conhecendo os locais onde existe a tendência de maior retenção de umidade é possível, por sua vez, indicar os locais onde se terá maiores criticidades, principalmente em períodos chuvosos.

A orientação de vertentes compõe, com a declividade, a geometria de exposição da superfície do terreno, indicando a direção da incidência da radiação solar e a direção do fluxo de água pelo terreno de acordo com Bispo et al. (2010). Portanto, unido a outros critérios, é capaz de expressar a representação do relevo e da hidrografia na paisagem, parâmetros importantes para o objetivo desse estudo.

### **3.3. Mapeamento de áreas críticas à locação de estradas**

A agregação dos critérios erodibilidade do solo, declividade, distância ao fluxo acumulado e orientação de vertentes, foi realizada por meio do método da Combinação Linear Ponderada (CLP), de AMC. Segundo Valente e Vettorazzi (2013) o método da CLP é um dos mais empregados, no âmbito da AMC, visto sua simplicidade de utilização e os bons resultados que permite obter.

Para a agregação dos critérios, o método pressupõe que (i) todos estejam na mesma unidade, cumprindo a etapa de normalização dos critérios; (ii) se conheça a importância relativa dos critérios, pela definição de seus pesos de fator; e (iii) se defina as restrições da área de estudo, ou seja, as áreas onde não se define um nível de criticidade com a agregação dos critérios. Essas etapas foram cumpridas, como descrito nos sub-itens 4.4, 4.5 e 4.7.

### **3.4. Normalização dos critérios**

A normalização ocorreu no próprio ambiente SIG, para uma escala variando de 0 a 255 bytes, por meio de funções de pertinências, que garantissem que os locais mais críticos (sob o ponto de vista do critério) fossem associados, no mapa final, aos maiores valores (255 bytes) na escala comum. Na Figura 5, são apresentadas as funções de pertinência utilizadas na normalização dos critérios.

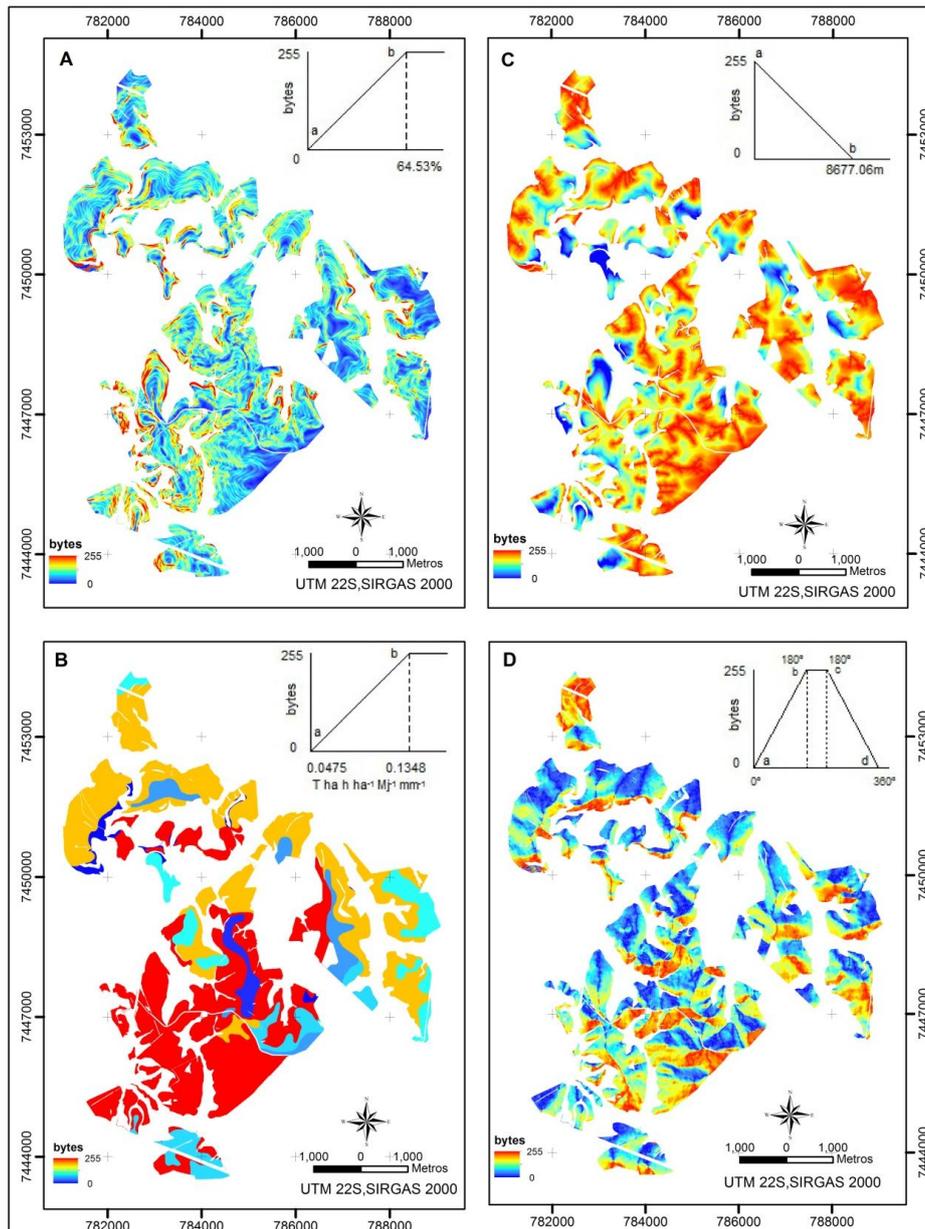


Figura 5- Critérios normalizados e respectivas funções de pertinência: (A) declividade, (B) erodibilidade do solo, (C) distância ao fluxo acumulado de água e (D) orientação de vertentes, da fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.

Para a normalização dos critérios erodibilidade e declividade, utilizou-se uma função linear crescente (Figura 5A e B), associando-se os maiores valores da escala aos maiores valores de K e declividade, respectivamente.

A normalização do critério distância ao fluxo acumulado de água realizou-se por meio de uma função linear decrescente (Figura 5C). Dessa forma, os maiores valores da escala foram associados às áreas consideradas mais críticas, para o critério, que são aquelas mais próximas de onde se acumula mais fluxo de água.

De modo a facilitar a normalização do critério orientação de vertentes, primeiramente este mapa foi reclassificado em duas seções (S) sendo de 0-180° (S1) e 180-360° (S2), pois cada face da orientação de vertentes possui uma influência diferente para locação de estradas, indicando superfícies mais úmidas ou não.

Levando em consideração que a orientação de vertentes varia de 0° a 360° e cresce em sentido horário, segundo Matte (2009) no hemisfério sul a face correspondente ao valor de 180° (S) equivale à face mais úmida e as faces 0° e 360° (N) equivalem às faces menos úmidas.

Diante disso, para sua normalização utilizou-se uma função linear simétrica (Figura 5D), sendo que a seção S1 (aumento da umidade) utilizou uma função crescente e, seção S2 (redução da umidade) uma função decrescente, sendo assim os maiores valores da escala atribuídos às faces mais úmidas do terreno.

### **3.5. Importância dos critérios**

O peso de fator (pf) é que indica a importância dos critérios no mapeamento. Para obter esse grupo de pesos, primeiramente houve o ranqueamento dos critérios, segundo sua importância relativa para o mapeamento. Após a consulta à literatura e especialistas obteve a declividade como critério mais importante, seguido por erodibilidade, distância ao fluxo acumulado e orientação de vertentes.

Segundo Çalıřkan (2013) a declividade é um dos principais critérios que deve ser notado no planejamento da rede de estradas florestais, considerando que afeta direta e indiretamente outros fatores, como por exemplo, a erodibilidade e escoamento superficial que estão relacionados ao gradiente da inclinação do terreno.

A intensidade da erodibilidade do solo, por sua vez, é mais influenciada pelo declive, pelas características das chuvas, pela cobertura vegetal e pelo manejo, do que pelas próprias propriedades do solo, sendo considerada um fator-chave para erosão do solo em estradas florestais, como citado por Parsakhoo et al. (2016). A erosão superficial do solo aumenta, sobretudo, o escoamento superficial (Froehlich, 1995; Ziegler et al., 2000), principalmente quando associada a altos valores de declividade.

A orientação de vertentes reflete a umidade presente no solo, devido à direção da incidência da radiação solar e, também, à direção do fluxo de água pelo terreno, como citado por Bispo et al. (2010) e, portanto, é influenciada pela declividade, fluxo acumulado de água e a erodibilidade do solo, sendo este critério considerado na última posição de importância no ranqueamento.

Após ranquear os critérios, utilizou-se o método da Comparação Pareada, desenvolvido por Saaty (1977), no contexto do Processo Hierárquico Analítico, para obter os pesos. O método baseia-se na elaboração de uma matriz de comparação, onde os valores atribuídos aos critérios são derivados de uma escala contínua de nove pontos. Com base nesta escala, os critérios são comparados entre si, dois a dois, e classificados segundo a importância relativa entre eles (Eastman, 2012).

As classificações são fornecidas em uma escala contínua de nove pontos. Os valores variam de 1/9 representando o menos importante, para 1 para igual importância e para 9 para o mais importante, abrangendo todos os valores no conjunto (Eastman 2012). A matriz de comparação pareada é simétrica e, portanto, preenchida apenas em sua parte triangular inferior. Os pesos são obtidos por meio de uma média ponderada, considerando os valores de comparação dos critérios.

Foram produzidas repetidas matrizes de comparação pareada com o intuito de gerar mapas com diferentes pesos de fator, e a partir das discussões e verificações de campo, foi possível obter-se o melhor ajuste do grupo de pesos de fator, e verificar os quais representaram a ordem de ranqueamento previamente definidas para eles. A matriz de comparação pareada é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3- Matriz de comparação pareada entre os mapas de critérios, para a fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.

Critérios	Declividade	Erodibilidade	Distância ao fluxo acumulado	Orientação de vertentes	Pesos de fator
Declividade	<b>1</b>				0,3120
Erodibilidade	1	<b>1</b>			0,2804
Distância ao fluxo acumulado	1	1	<b>1</b>		0,2804
Orientação de vertentes	1/3	1/2	1/2	<b>1</b>	0,1272
<i>Taxa de Consistência (TC) = 0,01</i>					1

Calcula-se, a partir da matriz quadrada, a Taxa de Consistência (TC), e esse valor de acordo com Saaty (1980) indica a probabilidade de que as classificações foram atribuídas aleatoriamente, e valores inferiores a 0,10 indicam boa consistência.

A TC obtida neste estudo foi de 0,01, valor este menor que o limite máximo de 0,10, indicando que os valores de comparação entre os critérios estão adequados.

### **3.6. Influência dos critérios**

Para o projeto final, inserimos mais este item com o intuito de avaliar individualmente os parâmetros físicos da paisagem relacionados ao relevo, solo e água, e para melhor entender os critérios, a relação entre os seus pesos de fator e os resultados obtidos no mapeamento final, assim, identificou-se a influência intrínseca desses critérios, como proposto por Valente e Vettorazzi (2008).

Os autores afirmaram que ela é comumente utilizada como pré-requisito para a aplicação do método da Média Ponderada Ordenada (MPO) de AMC, estando relacionada aos pesos de ordenação ( $po$ ), que justamente indicam a influência dos critérios no processo decisório. No entanto, mesmo não se utilizando MPO, decidiu-se por conhecer a influência dos critérios.

Segundo Jiang e Eastman (2000), a MPO engloba o método da CLP. Os autores esclarecem que se têm dois parâmetros associados ao primeiro método, que são o risco de tomada de decisão ( $R$ ) e a compensação entre critérios ( $C$ ) e, quando se tem  $R$  médio para o processo decisório e  $C$  total entre critérios, se tem equivalência à aplicação da CLP.

Neste contexto, definiu-se a influência dos critérios, associando-se sucessivamente  $po$  de máximo valor ( $po = 1$ ) a cada um deles, ou seja, foi-se atribuindo o valor um ( $po$ ) à posição um de critério e, concomitante, o valor zero às demais posições (dois a quatro). A semelhança do mapa gerado com um dos critérios, foi um indicativo daquele de menor influência. Posteriormente, associou-se  $po$  de máximo valor as demais posições, sendo que a posição quatro (4) indicou o critério com maior influência.

### **3.7. Restrições**

As restrições são características da paisagem que limitam as alternativas, ou seja, a distribuição das possibilidades de escolha.

Na área de estudo elas equivalem aos locais onde não haverá a locação de estradas, que são as áreas de APP, de vegetação nativa, sede, viveiro, rede elétrica e lagos/lagoas e limite da área de estudo, visto que haverá a geração de um mapa apenas para dentro de seus limites (Figura 6).

Para gerar este mapa de restrição, foram extraídas as classes que o compõem do mapa de uso e cobertura do solo e atribuído a elas identificador zero.

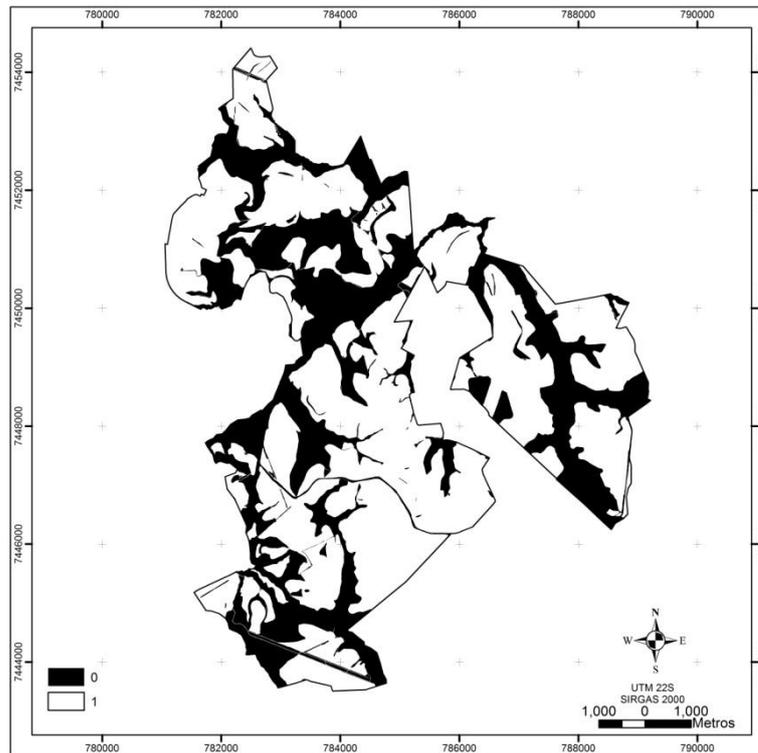


Figura 6- Áreas de restrição (AMC) para a fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.

### 3.8. Agregação dos critérios

Os critérios normalizados na escala 0-255 bytes foram agregados com o método da CLP, desenvolvido por Voogd (1983). Segundo o método ocorre a multiplicação dos mapas (operação pixel a pixel) por seus respectivos pesos (importância), somando-se os resultados, como indicado na Equação 2. Neste estudo, a equação foi desenvolvida por meio da calculadora do SIG.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i X_i * \prod_{j=1}^K c_j \quad \text{eq.2}$$

Sendo: S: valor final do score;  $w_i$ : peso do parâmetro fator  $i$  (com  $i=1, \dots, n$ );  $n$ : número de critérios;  $x_j$ : valor normalizado para o mesmo fator;  $c_j$ : score (0 ou 255) do parâmetro exclusão (com  $j=1, \dots, k$ ); e  $k$ : número de parâmetros de exclusão.

Aos critérios normalizados associaram-se os grupos de pesos de fator, gerados a partir da matriz de comparação pareada (Tabela 3).

Em seguida, o mapa de criticidade foi reclassificado em sete classes, sendo elas extremamente alta; muito alta; alta; média; baixa; muito baixa e extremamente baixa.. Como proposto por Vettorazzi e Valente (2016) uma classe de prioridade é composta

por valores de criticidade com homogeneidade de frequência. Avaliou-se previamente o histograma do mapa final, para definição das classes de criticidade.

Ainda o mapa final de áreas críticas à locação de estradas florestais foi sobreposto ao mapa de estradas, para obter o nível de criticidade dessas estradas.

### **3.9.Verificação do mapa de áreas críticas à locação de estradas florestais**

Para validar o mapa final, realizaram-se dois procedimentos, sendo que primeiramente definiram-se parâmetros que pudessem ser avaliados em campo, os quais refletiam os critérios e, sobretudo, seus níveis de importância. Com o segundo, avaliou-se a relação entre o nível de criticidade do mapa e a realidade da paisagem.

Para as validações em campo utilizou-se uma amostragem casual simples, com estimador de proporção (eq.3 e 4), e os pontos amostrais foram determinados a partir de uma amostragem estratificada ao acaso, como proposto por Eastman (2001).

$$N = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2} \quad \text{eq. 3}$$

$$A = \frac{N}{a} \quad \text{eq. 4}$$

Sendo: N= número de amostras; z= valor padrão para um nível de confiança específico; p= percentual de exatidão esperado; q= 100 – p; e= erro permissível; A= número de amostras para a área de estudo; e a= área de estudo (proporção).

Foram considerados os valores de 85% para o percentual de exatidão esperado e 5% para o erro admissível, sendo obtidos 563 pontos (N) para a área inteira. Considerando-se somente as estradas, excluindo-se as restrições, foi obtido um total de 90 pontos (A), dos quais se registraram, em campo, as coordenadas geográficas. A geração e a distribuição desses pontos foram realizadas em ambiente SIG.

Os parâmetros avaliados, em campo, no primeiro procedimento, foram a declividade e os valores de altitude, os quais permitiram validar o MNT que, por sua vez, foi empregado para produzir os critérios declividade, distância ao fluxo acumulado de água e a orientação de vertentes.

Registrou-se a declividade, dos pontos amostrais, com hipsômetro e os valores de altitude com o receptor GPS. Observaram-se, ainda, as condições gerais das estradas, nos dias de campo.

Para os pontos amostrados identificou-se, ainda, o valor a eles atribuídos nos mapas de critérios (declividade e MNT). Dessa forma, comparando os valores que se

tinha nos mapas de critérios e os obtidos em campo, foi possível validar os mapas de critérios.

Para a validação do mapa final (segundo procedimento), necessitou identificar os valores da malha amostral nos demais mapas de critérios já validados, ou seja, nos mapas de erodibilidade, distância ao fluxo acumulado de água e orientação de vertentes. Esses valores foram multiplicados por seus respectivos pesos de fator, como indicado pelo algoritmo da CLP. O valor resultante foi sendo associado ao nível de criticidade, de acordo com os intervalos das sete classes, previamente definidas para o mapa final.

Desta forma, para o mesmo ponto se tinha a classe de criticidade obtida no mapa final e, também, calculada a partir dos pontos amostrados. Com esses dois grupos de valores (mapa e campo) elaborou-se uma tabela para se ter a coincidência entre os pontos. Quando se tinha assertividade associava-se o valor 1, caso contrário o valor 0.

Os valores binários (0 e 1) dos pontos e seu corresponde valor de nível de criticidade do mapa final, permitiram elaborar a curva ROC (Receiver Operating Characteristic), no ambiente do programa estatístico R.

A análise ROC é um método gráfico para avaliação, organização e seleção de sistemas de diagnóstico e/ou de predição (Prati et al., 2008). Ela é comumente utilizada em pesquisas de medicina, porém vem sendo empregada para validar mapas gerados no ambiente SIG, como por exemplo, os gerados nos trabalhos de Pradhan (2009); Manap et al. (2014); Nampak et al. (2014); Park et al. (2014); Xiong e Zuo (2017) e Rahmati et al. (2018).

A análise baseia-se na medição da sensibilidade, que é a taxa de verdadeiros positivos (ausência de erro de omissão) versus o complemento da especificidade (1 menos especificidade) que é a taxa de falsos positivos (Pradhan and Lee, 2010). A área sob a função ROC (AUC = Area Under Curve) é uma medida efetiva e combinada de sensibilidade e especificidade que descreve a validade inerente dos testes diagnósticos (Kummar e Indrayan, 2011) e permite comparar dois ou mais modelos de predição, sendo este um de seus maiores benefícios (Margotto, 2010). Ou seja, a AUC é uma medida da capacidade discriminativa de um método, isto é, a capacidade de um método ter sido classificado corretamente.

#### 4. RESULTADOS

O mapa das áreas críticas à locação de estradas florestais (Figura 7), obtido a partir da agregação de mapas de critérios pelo método CLP de AMC, indicou que 0,06% da fazenda foi associada a uma criticidade extremamente alta; 10,90% muito alta; 39,46% alta; 29,68% média; 15,61% baixa; 4,14% muito baixa e 0,14% extremamente baixa. A soma dessas porcentagens equivale a área de 2446,88 ha, a qual refere-se a área total da fazenda, excluindo suas restrições (i.e. onde não haverá locação de estradas), ou seja, as feições APP, vegetação nativa, sede, viveiro, rede elétrica e lagos/lagoas.

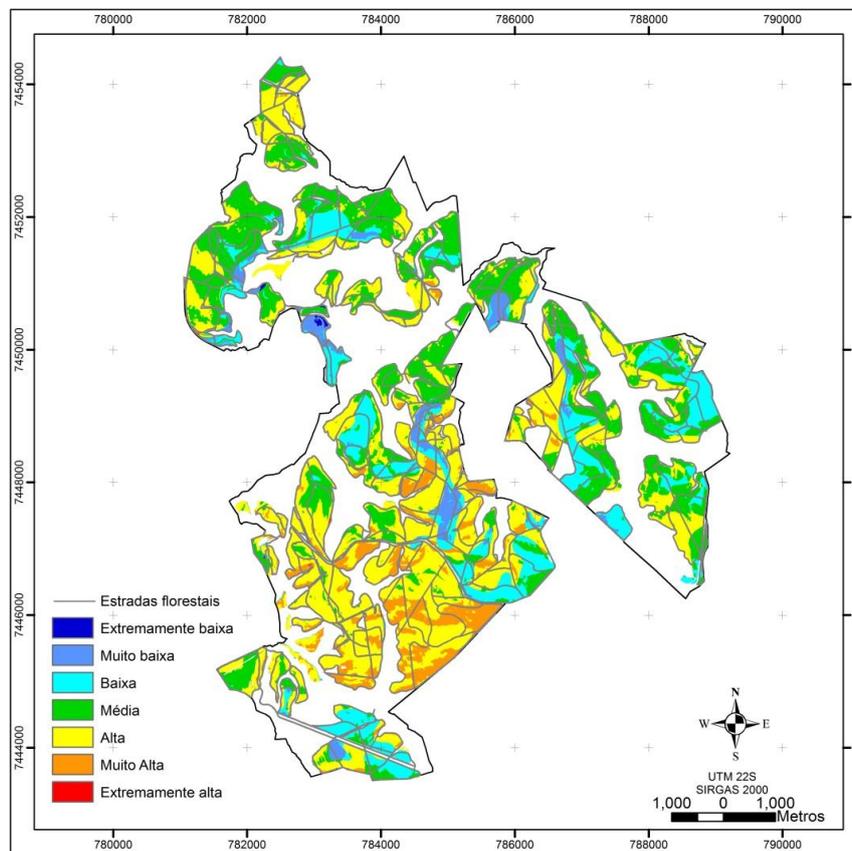


Figura 7- Áreas à locação de estradas florestais, em níveis de criticidade, para fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.

No que se refere exclusivamente ao nível de criticidade associado às estradas existentes atualmente, 0,36% da fazenda associada a criticidade extremamente alta; 15,23% muito alta; 37,79% alta; 21,78% média; 17,43% baixa; 6,97% muito baixa e 0,43% extremamente baixa. Essas porcentagens são referentes a 153,66 ha, equivalendo apenas as estradas florestais, existentes na fazenda Santa Terezinha. Na

Figura 8 são exemplificadas as situações em campo associadas à essas estradas, com diferentes níveis de criticidade.



Figura 8- Estradas florestais classificadas em níveis de criticidade: (A) extremamente baixa; (B) muito baixa; (C) baixa; (D) média; (E) alta; (F) muito alta e (G) extremamente alta; da fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.

Quando se avaliou a influência dos critérios no mapa final, observou-se que a distância ao fluxo acumulado foi o critério com maior influência no processo decisório, seguido pelos critérios, erodibilidade, orientação de vertentes e declividade.

Comparando os mapas de critérios utilizados na AMC com os valores obtidos em campo, observou-se que os níveis de criticidade extremamente baixa, média, alta, muito alta e extremamente alta, obtiveram uma exatidão igual a 100%, o nível de criticidade muito baixa uma exatidão de 85,71% e baixa igual a 81,82%.

A AUC produzida para a CLP (Figura 9) foi igual a 0,931, com intervalo de confiança variando entre 0,821 e 1. Isto significa que o mapa de áreas críticas gerado, pelo método da AMC, apresentou um limiar de 17,9% e acurácia de 93,1%, na predição da representatividade dos critérios no mapa final de áreas críticas. O valor da acurácia é

estatisticamente significativo, descartando a hipótese nula que seria de uma AUC de 0,50, a qual indicaria que os critérios não estariam sendo representados no mapa final.

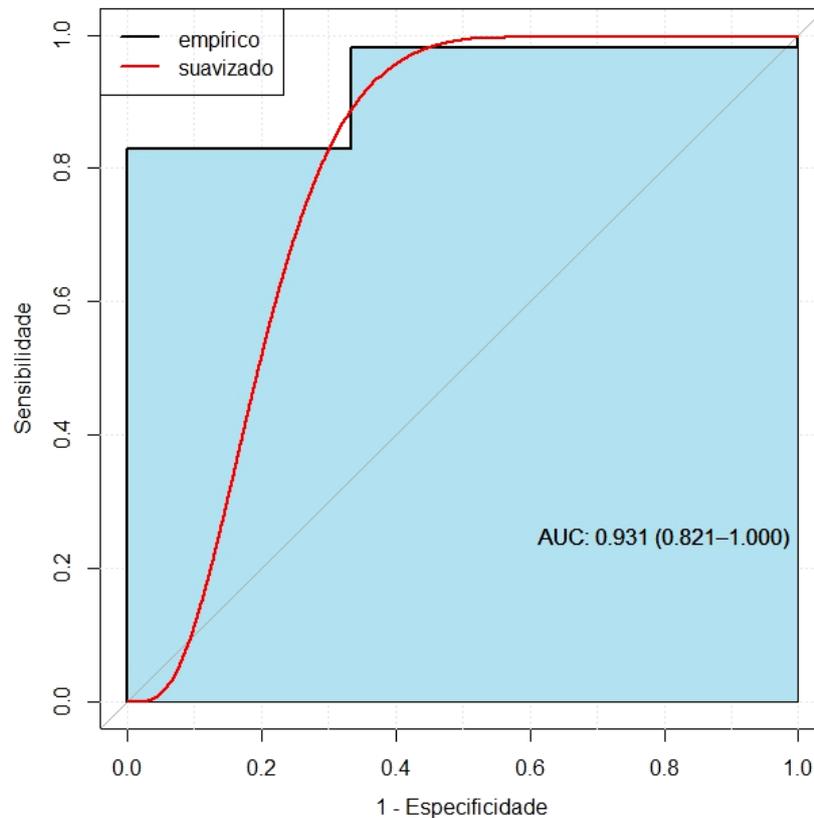


Figura 9- Curva ROC do método da CLP, para a fazenda Santa Terezinha no município de Bofete, estado de São Paulo.

## 5. DISCUSSÃO

A partir da agregação dos critérios com o método CLP de AMC, obteve os níveis de criticidade, sendo que os níveis de criticidade alta, média e baixa representaram juntos 84,75% da área de estudo. A concentração de área associada a essas três classes e, não predominantemente as extremas (baixa ou alta) é uma característica do método da CLP (Malczewski, 2000; Malczewski et al., 2003). Autores como Malczewski et al. (2003), Boroushaki e Malczewski (2008), Valente e Vettorazzi (2008; 2013) indicaram que os mapas desenvolvidos por meio do método da CLP têm uma tendência para a generalização, com uma alta porcentagem de área classificada como média prioridade. Por esta razão, os mapas gerados pela CLP apresentam soluções "não arriscadas" para o processo de tomada de decisão.

Outra característica comumente associada ao método, que depende dos valores associados aos pfs e da influência dos critérios, é a produção de um mapa final com as características predominantes do mais influente (Malczewski (2003); Valente e Vettorazzi (2008); Ferretti e Pomarico (2013) e Vettorazzi e Valente (2016)).

No presente estudo, o critério mais influente foi a distância ao fluxo acumulado (Figura 5-C), porém o mapa final (Figura 7) não apresentou predominantemente suas características e, sim, do conjunto de critérios selecionados e, ainda, considerando a suas respectivas importâncias (i.e. pf). Mesmo porque a distância ao fluxo acumulado foi considerada com importância igual a erodibilidade, ocupando a segunda posição no grupo. Como mencionado por Vettorazzi e Valente (2016) é comum se ter feições que predominam em uma paisagem, associadas a seus critérios de maior influência, justamente por estarem distribuídas pela área de estudo.

O segundo critério mais influente e importante, foi a erodibilidade, que mesmo normalizado, manteve evidente os limites de classes, que por sua vez não predominaram no mapa final de criticidade (Figuras 5-B e 7).

Vettorazzi e Valente (2016), de maneira contrária ao que ocorreu nesse estudo, obtiveram o mapa final fortemente influenciado por critérios, que se apresentavam em classes, ou seja, sem uma espacialização contínua dos limites das classes dos polígonos.

Outro aspecto que influenciou, não apenas nesse critério, foi o detalhamento do banco cartográfico. Utilizou-se, como Valente et al. (2017) e Silva et al. (2017), a resolução espacial de cinco metros, com conseqüente detalhamento dos critérios, o que pode ter influenciado positivamente na aplicação da CLP. Assim, com o detalhamento do banco de dados, pode-se ter uma melhor espacialização, mesmo utilizando algoritmo tradicional de médias, que é a CLP.

Já o terceiro critério em ordem de influência, foi a orientação de vertentes, que mesmo tendo recebido menor pf (12,72%, Tabela 3) contribuiu para a definição de locais críticos. Por exemplo, em locais onde se tinha acúmulo de fluxo de água, declividade e valores de erodibilidade diferentes, mas com baixo valor para esse critério, ele ainda manteve influência no mapa final.

A declividade, por sua vez, foi o critério de menor influência no processo decisório, mesmo tendo sido considerada o mais importante (pf = 31,20%, Tabela 3). Essa associação de maior valor de pf, ao critério menos influente do processo foi, nesse estudo, um ponto positivo. Pode-se dizer assim então, que a baixa influencia foi compensada por sua importância, considerando o objetivo do estudo.

Dessa forma, os pfs permitiram uma combinação adequada dos critérios, produzindo um mapa de criticidade, o qual representa as reais características da área de estudo. Por exemplo, no que diz respeito às estradas que se tem locadas na fazenda florestal, como exemplificado pela Figura 8, é possível observar que o nível de criticidade é proporcional à intensidade da representação de critérios em um determinado local no campo (escala 0 a 255 bytes).

Sendo assim, quando se tinha pontos associados aos baixos níveis de criticidade (valores próximos a 0 bytes), se tinha no campo regiões em locais apropriados para se ter estradas, e por isto, as já locadas estavam em boas condições (Figura 8-A).

A Figura 8-G, ilustra uma estrada que foi classificada com criticidade extremamente alta e, neste exemplo, a presença de um processo de uma erosão. Nessa condição, a estrada sofreu influência da alta declividade, da proximidade ao fluxo acumulado de água, ao solo com alta erodibilidade e uma área úmida. E, com isso, comprovou-se a relação de correspondência entre o mapa e as estradas existentes na fazenda.

De acordo com Valente e Vettorazzi (2008), isto está relacionado com a forma contínua como os critérios são representados na Avaliação Multicriterial e, sobretudo, aos pesos que foram associados aos critérios.

A partir da avaliação das estradas existentes atualmente, conjuntamente com os mapas de critérios e o mapa final, foi observada correspondência entre os valores dos pesos associados aos critérios, gerando assim um mapa adequado a partir do processo decisório.

Neste contexto, a análise estatística ROC (Figura 9), contribuiu com mais uma avaliação da metodologia aqui empregada, indicando uma acurácia igual a 93,1%. De acordo com Berrar e Flach (2011), um bom classificador deve ter uma AUC próxima a um, o que indica um resultado estatisticamente significativo para a metodologia empregada, no qual os critérios estão sendo representados no mapa final. Dessa forma, o método da CLP foi adequado e a vantagem de se obter bons resultados com o método tradicional da AMC, está no fato de ser um método flexível e de fácil implementação, segundo Valente et al. (2017).

Para este estudo, a espacialização de áreas críticas (i.e. estradas) está de acordo com o que foi definido pelo processo decisório. Deste modo, os quatro critérios selecionados para indicar áreas críticas à locação de estradas, representaram as características críticas, visando à conservação da água e do solo da paisagem.

Atualmente, os gerentes florestais e silvicultores devem estar mais atentos ao delineamento, construção, assim como a manutenção das estradas florestais. Principalmente devido ao fato, de que a maioria dos custos do manejo florestal estão relacionados à construção e a manutenção de estradas florestais e que os efeitos ambientais negativos gerados são irrecuperáveis, como apontam Dutton et al.,(2005) e Çalışkan (2013).

## **6. CONCLUSÕES**

O método da Combinação Linear Ponderada de Avaliação Multicriterial permite definir áreas críticas à locação de estradas florestais, a partir dos critérios selecionados, os quais são de fácil elaboração e representam as características críticas para as estradas florestais.

A partir da análise ROC é possível verificar a exatidão do mapa final, com uma assertividade estatisticamente significativa. E, ainda, validar que os critérios contribuíram para sua produção do mapeamento, considerando suas importâncias relativas e respectivas influências no processo decisório.

Pode-se concluir, ainda, que é possível utilizar o método da CLP no planejamento da rede viária florestal, considerando aspectos críticos da paisagem, de forma a ter tanto a conservação do solo quanto da água da paisagem.

## REFERÊNCIAS

- Abdi,E.;Sisakht,S.R.;Goushbor,L.; Soufi, H. Accuracy assessment of GPS and surveying technique in forest road mapping. **Annals of Forest Research**,55: p. 309–317, 2012.
- Akgul,M,Yurtseven,H.,Akburak,S.,Dmir,M.,Kerem,C.H.,Ozturk,T.,Eksi,M.,Akay,A. Short Term Monitoring of Forest Road Pavement Degradation Using Terrestrial LaserScanning,**Measurement**,2017,doi://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.45.
- Alvares,C.A.,Stape,J.L.,Sentelhas,P.C.,Gonçalves,J.L.M.,Sparovek,G.Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22,n.6, p.711-728, 2013.
- Aricak, B. Using remote sensing data to predict road fill areas and areas affected by fill erosion with planned forest road construction: a case study in Kastamonu Regional Forest Directorate (Turkey). **Environmental Monitoring And Assessment**, v. 187, n. 7, p.1-10,2015.
- Berrar,D., Flach,P. Caveats and pitfalls of ROC analysis in clinical microarray research (and how to avoid them). **Briefings in Bioinformatics**, v.13, n.1, p. 83–97,2011.
- Bispo,P.daC.,Valeriano,M.de M,Kuplich,T.M. Relação entre as variáveis morfométricas extraídas de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e a vegetação do Parque Nacional de Brasília. **Acta botânica brasileira**, n. 24, v.1, p. 96-103, 2010.
- Borouhaki, S.; Malczewski, J. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operator with fuzzy. **Computer and Geosciences**, v.34, n.4, p.399-410, 2008.
- Bouyoucos, G. J. The Clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. **Journal of the American Society of Agronomy**, v.27, p. 738-741,1935.
- Çalışkan, E. Planning of forest road network and analysis in mountainous area. **Life Science Journal**,v.10,v.2, p.2456–2465,2013.
- Caliskan,E.Environmental impacts of forest road construction on mountainous terrain. Iran. J. Environ. Health. **Sci. Eng.** Vol. 10:23, p. 1 -8, 2013.
- CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA – CEPAGRI. Clima dos municípios paulistas. Campinas, 2014. Disponível em:<[https://www.cpa.unicamp.br/outrasinformacoes/clima\\_muni\\_078.html](https://www.cpa.unicamp.br/outrasinformacoes/clima_muni_078.html)>. Acessado em: 05 de maio de 2018.

- Cogo, N. P; Levien, R; Schwarz, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 743 - 753, 2003
- Coker, R., Fahey, B., Payne, J. Fine sediment production from truck traffic, Queen Charlotte Forest, Marlborough Sounds, New Zealand. **J. Hydrol. NZ** v.31,p.56–64, 1993.
- Demir, M., Makineci, E., Yilmaz, E. Investigation of timber harvesting impacts on herbaceous cover, forest floor and surface soil properties on skid road in an oak (*Quercus petrea* L.) stand. **Build. Environ.** V.42, p.1194–1199, 2007.
- Dutton, A.L., Loague, K., Wemple, B.C. Road sediment production and delivery: Processes and management. **Earth surf. Process. Land form**, v. 30, p.325-338,2005.
- Dyrness, C.T. Soil surface condition following tractor and high-lead logging in the Oregon cascades. **J. For.** v.63, p. 272–275, 1965.
- Eastman, J.R. Idrisi32, Release 2: Tutorial. Worcester: Clark University, USA,2001.
- Eastman, J. R. **IDRISI selva: guide to GIS and image processing**. 2012, 322p.
- Egan,A.; Jenkins, A.; Rowe, J. Forest road in west Virginia, USA: Virginia University Morgan, Town, WV,USA. p. 8, 1985.
- Eker, R.; Aydin, A. Assessment of forest road conditions in terms of landslide susceptibility: a case study in Yiğilca forest directorate (Turkey). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**,v. 38, p. 281–290, 2014.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 2006, Rio de Janeiro. Súmula... Rio de Janeiro, 2006. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).
- Eskandari,S.; Hosseini, S.A. Assessment of Drainage System Standards of Forest Roads in Iran Using GIS. **Pol. J. Environ. Stud.** v. 22, n. 3, p. 675-682,2013.
- FAO, Irrigation and Drainage Paper No. 46, **CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management**, p. 48, 1992.
- Florenzano, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, c 2008a. p. 72-104.
- Francisco, C. E. S.; Coelho, R. M.; Torres, R. B.; Adami, S. F. Análise multicriterial na seleção de bacia hidrográfica para a recuperação ambiental.**Ciência Florestal**, v. 18, n. 1, p. 1 – 13, 2008.
- Froehlich, W. Sediment Dynamics in the Polish Flysch Carpathians. In: Foster, I.D.L.,

- Gurnell, A.M., Webb, B.W. (Eds.), *Sediment and Water Quality in River Catchments*. **John Wiley & Sons**, Chichester, p. 454–461, 1995.
- Furniss, M.J., Roelofs, T.D., Yee, C.S.: Road construction and maintenance. In: Meehan, W.R. (ed.) *Influences of Forest and Rangeland Management*. Special Pub. 19, Chapter 8, p. 297–324. **American Fisheries Society**, Bethesda, 1991.
- Geneletti, D., Gorte, B.G.H. A method for object-oriented land cover classification combining Landsat TM data and aerial photographs. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n.6, p.1273–1286, 2003.
- Geneletti, D. Biodiversity impact assessment of roads: an approach based on ecosystem rarity. **Environ. Impact. Assess. Rev.**, v.23, p 343-365, 2003.
- Gonçalves, G. G. G., Daniel, O., Comunello, E., Vitorino, A. C. T.; Arai, F. K. Determinação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. **Floresta**, v. 41, n. 4, p. 797 - 808, 2011.
- Goode, J.R., Luce, C.H., Buffington, J.M., 2012. Enhanced sediment delivery in a changing climate in semi-arid mountain basins: implications for water resource management and aquatic habitat in the northern Rocky Mountains. **Geomorphology** p.139-140, 1–15, 2012.
- Gresswell, S., Heller, D., Swanston, D.N. Mass Movement Response to Forest Management in the Central Oregon Coast Ranges. **Resource Bulletin** PNW-84. USDA - Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR, 1979.
- Gucinski, H., Furniss, M.J., Ziemer, R.R., Brookes, M. *Forest Roads: A Synthesis of Scientific Information*. General Technical Report PNW-GTR-509. USDA- Forest Service, **Pacific Northwest Research Station**, Portland, OR, 2001.
- Imhoff, S., Pires da Silva, A., Dexter, A. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v.66, p.1656–1661, 2002.
- Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J., Sattarian, A. Modeling erosion and sediment delivery from unpaved roads in the north mountainous forest of Iran. **GEM—Int. J. Geomath.** v. 6, n. 2, p. 343–356, 2014.
- Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J., Sattarian, A., Ghajar, I. Planning road networks in landslide-prone areas: A case study from the northern forests of Iran. **Land Use Policy**, [s.l.], v. 47, p.198-208, 2015.
- Jiang, H.; Eastman, J.R. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v.14, n.2, p.173-184, 2000.

- Jordán-López, A., Martínez-Zavala, L., Bellinfante, N. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area. **Sci.Total Environ.** v.407, p.937–944,2009
- El Kateb, H.; Zhang, H.; Zhang, P.; Mosandl, R. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: a field experiment in Southern Shaanxi Province, China. **Catena**, v. 105, p. 1-10, 2013.
- Keller,G.,Sherar.J. **Low-volume roads engineering**. Best management practices field guide, US Agency for International Development (USA ID),Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003, 158 p.
- Köppen J.W. **Climatología con uno Estudio de los Climas de la Tierra**. Mexico: Fondo de Cultura Económica,1948. 478p.
- Kumar,R.,Indrayan,A. Receiver operating characteristic (ROC) curve for medical researchers. **Indian Pediatr.** v.48,n.4,p.277-87,2011.
- LaMarche, J.L., Lettenmaier, D.P.Effects of forest roads on flood flows in the Deschutes River. Washington. **Earth Surf. Process. Landf.** v.26, p.115–134, 2001.
- Larsen,M.C.,Parks,J.E.,1997. How wide is a road? The association of roads and mass-wasting in a forested mountain environment. **Earth Surf. Process Landf.** v.22, p. 835-848,1997.
- Le Bissonnais, Y.. Aggregate stability and assessment of soil crustibility: I. Theory and methodology. **Eur. J. Soil Sci.** v.47, p. 425–437,1996.
- Lu, Q.,Chang, N., Joyce, J., Chen, A.S., Savic, D.A., Djordjevic,S. Exploring the potential climate change impact on urban growth in London by a cellular automata-based Markov chain model. **Computers, Environment And Urban Systems**, v. 68, p.121-132,2018.
- Luce, C.H., Black, T.A. Sediment production from forest roads in western region. **Water Resour. Res.** v.35. n.8, p. 2561–2570, 1999.
- Luce, C.H., Black, T.A. Effects of traffic and ditch maintenance on forest road sediment production. In: Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25–29, 2001, Reno, Nevada, p. 67–74,2001.
- MacDonald, L.H., Stednick, J.D. Forests and Water: A State of the Art Review for Colorado. Colorado Water Resources Research Institute. Colorado State University, **Fort Collins**, CO. 65 p., 2003.

- MacDonald, L.H., Anderson, D.M., Dietrich, W.E., 1997. Paradise threatened: land use and erosion on St. John, U.S. Virgin Islands. **Environ. Manage.** v. 21, n.6, p. 851–863, 1997.
- Machado, C.C. **Construção e conservação de estradas rurais e florestais.** Viçosa, MG: SIF, 2013. 441p.
- Malczewski, J.; Chapman, T.; Flegel, C.; Walters, D.; Shrubsole, D.; Healy, M.A. GIS-multicriteria evaluation with Ordered Weighted Averaging (OWA): developing management strategies for rehabilitation and enhancement projects in the Cedar Creek watershed. **Environment and Planning**, v.35, n.10, p.1769-1784, 2003.
- Malczewski, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**. v.62,p.3-65,2004.
- Malczewski, J. Multiple criteria decision analysis and geographic information systems. In: Trends in multiple criteria decision analysis. **Springer US**, 2010. p. 369-395.
- Malczewski, J.; Rinner, C. Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science. London: **Springer**, 2015. 331p.
- Malinovski, J. R.; Carvalho, L. C.; Carvalho, M. Planejamento de rede viária. **Relatório Técnico Klabin**. 2004.
- Manap, M.A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F. Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. **Am. J. Geosci.**, v.7, n.2, p.711-724, 2014.
- Margotto, P. R. Curva ROC como fazer e interpretar no SPSS. Escola Superior de Ciências da Saúde, Distrito Federal, 2010.
- Martins, F.C.M.; Andrade, L.C.R.; Calijuri, M.L.; Barros, K.O.; Barreto, E.M. Multicriteria analysis and geoprocessing for conservation of unpaved roads. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 37, n.2, p. 162-170, 2014.
- Matte, A. L. L. **Padrões de distribuição, estrutura e contexto de manchas florestais em um mosaico de campo e floresta no planalto sul brasileiro.** 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Megahan, W.F.: Effects of forest roads on watershed function in mountainous areas. In: Balasubramiam, A.A.(ed.) Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks, p. 335–347. **Balkema Publishing, Rotterdam**, 1987.

- Meignan,D.;Frayret,J.M.;Pesant,G.Interactive planning system for forest road location. **Journal Of Heuristics**, v. 21, n. 6, p.789-817, 2015.
- Motha, J.A., Wallbrink, P.J., Hairsine, P.B., Grayson, R.B. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia. **Water Resour. Res.** v.39, n.3, p. 1056, 2003.
- Nampak, H., Pradhan, B., Manap, M.A., 2014. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *J. Hydrol.* v.513, p. 283-300,2014.
- O'Callaghan,J.F.;Mark,D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* v. 28, p. 323-344,1984.
- Oliveira, F. P. de et al. Avaliação de perdas de solo em estradas florestais não pavimentadas no Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p.331-339, 2010.
- Oliveira,J.F.de;GRIEBELE,N.P.;GARVIL,R.A.;OLIVEIRA,J.deM.;RABELO,M.W de O. Uso do software Estradas para determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas do interior de Goiás. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 1, p.17-22, 2011.
- Oliveira, R.J., Machado, C.C., Cordeiro, S.A., Leite, H.G., Silva, J..Análise de Processo Hierárquico para Gerir as Estradas Florestais.*Floresta e Ambiente*, v. 20, n.1. p.38-44, 2013.
- Ozturk T. e Inan M. Comparisons of environmental effects and productivity by road construction machines in forest areas in Turkey. **African Journal of Biotechnology**, 9(31), 4918–4925, 2010.
- Park, I., Kim, Y., Lee, S. Groundwater productivity potential mapping using evidential belief function. **Grundwasser**, v.52 (S1), p 201-207,2014.
- Parsakhoo,A. Technical assessment of forest road network using Backmund and surface distribution algorithm in a hardwood forest of Hyrcanian zone. **Forest Systems**, v.25: n.2, e059, p.1-9, 2016.
- Pradhan, B.Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. **Cent. Eur. J. Geosci.**, v.1, n.1,p. 120-129, 2009.
- Pradhan,B.,Lee,S.Landslidesusceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio

- and bivariate logistic regression modelling. **Environmental Modelling e Software**, 25,p.747-759, 2010.
- Prati, R. C.; Batista, G. E. A. P. A.; Monard, M. C. Curvas ROC para avaliação de classificadores. **Revista IEEE América Latina**, v. 6, n. 2, p. 215-222, 2008.
- Qinsen, Y.,Shuren, S.A soil-tool interaction model for bulldozer blades. **J. Terrramech**. v.31, p.55–65, 1994.
- Rahmati,O., Kornejady,A.,Samadi,M.,Nobre,A.D.,Melesse,A.M. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. **Environmental Modelling & Software**, v.102, p.1-12, 2018.
- Ramos-Scharrón, C.E., MacDonald, L.H. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St. John, US Virgin Islands. **Earth Surf. Proc. Land**. v.30, n.10, p.1283–1304,2005.
- Randhir, T.O.; Connor, R.O.; Penner, P.R.; Goodwin,D.W. A watershed-based land prioritization model for water supply protection. **Forest Ecology and Management**, v.143, p.47-56,2001.
- Reid, L.M., Dunne, T. Sediment production from forest road surfaces. **Water Resour. Res.** v.20, n.11, p.1753–1761, 1984.
- Reinert, D. J.; Reichert, R. M. Propriedades físicas do solo. Santa Maria, UFSM, 18 p., 2006.
- Rennó, C.D.; Nobre, A.D.; Cuartas, L.A.; Soares, J.V.; Hodnett, M.G.; Tomasella, J.; Waterloo, M.J. Hand, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.9, p.3469-3481, 2008.
- Saaty,T. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology** , Philadelphia, v.15, p.234-281,1977.
- Saaty, T.L. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill,287 p.,1980.
- Safari, A., Kavian,A.,Parsakhoo,A.,Saleh,I.,Jordán,A . Impact of different parts of skid trails on runoff and soil erosion in the Hyrcanian forest (northern Iran). **Geoderma**, [s.l.], v. 263, p.161-167, 2016.
- Santos,J.F.c dos, Silva,H.R.F, Pinto, F.A.C., Assis, I.R.de. Use of digital images to estimate soil moisture. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**.v.20,n.12,p.1051-1056,2016.

- Sheridan, G.J., Noske, P.J., Whipp, R.K., Wijesinghe, N. The effect of truck traffic and road water content on sediment delivery from unpaved forest roads. **Hydrol. Process.** v.20, n.8, p.1683–1699, 2006.
- Sidle, R.C., Pearce, A.J., O'Loughlin, C.L. Hillslope Stability and Land Use. Water Resources Monograph Series No. 11. **American Geophysical Union**, Washington, DC, 1985.
- Silva, V.A.M., Mello, K. de, Vettorazzi, C.A., Costa, D.R. da, Valente, R.A. Priority areas for forest conservation, aiming at the maintenance of water resources, through the multicriteria evaluation. **Revista Árvore**, v.41, n.1, :e410119, 2017.
- Silveira, H.L. F da; Vettorazzi, C.A.; Valente, R.A. Avaliação multicriterial no mapeamento da suscetibilidade de deslizamento de terra. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.6, p.973-982, 2014.
- Sobrinho, T.A.; Oliveira, P.T.S.; Rodrigues, D.B.B.; Ayres, F.M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. p. 46- 57, 2010.
- Sosa-Pérez, G.; Macdonald, L. H.. Effects of closed roads, traffic, and road decommissioning on infiltration and sediment production: A comparative study using rainfall simulations. **Catena**, v. 159, p.93-105, 2017.
- Stafford, A.K. Sediment production and delivery from hillslopes and forest roads in the southern Sierra Nevada, California M.S. thesis. Colorado State University, Fort Collins, CO. 197p., 2011.
- Su, S. L.; Singh, D. N.; Baghin, I. M. S. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v.54, p.92-105, 2014.
- Switalski, T.A., Bissonette, J.A., DeLuca, T.H., Luce, C.H., Madej, M.A. Benefits and impacts of road removal. **Front. Ecol. Environ.** v.2, n.1, 21–28, 2004.
- Tampekis, S.; Sakellariou, S.; Samara, F.; Sfougaris, A.; Jaeger, D.; Christopoulou, O. Mapping the optimal forest road network based on the multicriteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.187, p. 687, 2015.
- Valente, R.A., Vettorazzi, C.A. Avaliação multicriterial na definição de áreas prioritárias à restauração florestal, visando ao manejo sustentável da água. In: Argemiro L. B.; Carolina B.; Jeferson, F.; Selbach; O. H.. (Org.). Sustentabilidade do uso da água nos trópicos e subtropicais: estudos de caso. Ijuí: Unijui, v. 1, p. 285-318, 2013.

- Valente, R.A., Vettorazzi, C.A. Definition of priority areas for forest conservation through the Ordered Weighted Averaging method. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.256, p.1408 – 1417, 2008.
- Valente, R.A., Petean, F.C. de S., Vettorazzi, C.A. Multicriteria decision analysis for prioritizing areas for forest restoration. **Revista Cerne**, v.23, n.1, p.53-60, 2017.
- van Meerveld, H.J., Baird, E.J., Floyd, W.C. Controls on sediment production from an unpaved resource road in a Pacific maritime watershed. **Water Resour. Res.** v.50, n.6, p. 4803–4820, 2014.
- Vettorazzi, C. A.; Valente, R. A. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources. **Ecological Engineering**, v. 94, p. 255-267, 2016.
- Voogd, H. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. London: **Pion**, 1983. p. 125.
- Weaver, W.E., Weppner, E.M., Hagans, D.K. Handbook for Forest, Ranch and Rural Roads: A Guide for Planning, Designing, Constructing, Reconstructing, Upgrading, Maintaining and Closing Wildland Roads, Mendocino County Resource Conservation District, Ukiah, California, 2015.
- Wemple, B.C., Jones, J.A., Grant, G.E. Channel network extension by logging roads in two basins, western Cascades, Oregon. **Water Resour. Bull.** v.32, p.1195–1207, 1996.
- Wischmeier, W.H.; Mannering, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of America Proceedings**, n.33, p.65-69, 1969.
- Wu, X., Wei, Y., Wang, J., Wang, D., She, L., Wang, J., Cai, C. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient. **Catena**. Elsevier v. 156, p.205-215, 2017.
- Xiong, Y., Zuo, R., GIS-based rare events logistic regression for mineral prospectivity mapping, **Computers and Geosciences** (2017), doi: 10.1016/j.cageo.2017.10.005.
- Zhang, H.; Yao, Z.; Yang, Q.; LI, S.; Baartman, J.E.M.; GAI, L.; Yao, M.; Yang, X.; Ritsema, C.; Geissen, V... An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs. **Catena**, v.151, p.174-181, 2017.
- Ziegler, A.D., Giambelluca, T.W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. **J. Hydrol.** 196, 204–229, 1997.
- Ziegler, A.D., Sutherland, R.A., Giambelluca, T.W. Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: the roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. **Water Resour. Res.** v.36, p.2787–2791, 2000.

