

APLICAÇÃO DAS LÓGICAS BOOLEANA E FUZZY NA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS APTAS PARA A IMPLANTAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO

APPLICATION OF BOOLEAN AND FUZZY LOGIC IN THE DETERMINATION OF SUITABLE AREAS FOR THE IMPLEMENTATION OF SANITARY LANDFILLS

Renata Costa LOPES, Raquel Naiara FERNANDES SILVA

Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Civil. Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia - MG. E-mail: renata.lopes@ufu.br; raquelfernandes@ufu.br

Introdução
Modelagem numérica
Lógica booleana
Lógica *fuzzy*
Materiais e métodos
Área de estudo
Materiais
Métodos
Modelagem Booleana
Modelagem Fuzzy
Resultados e discussões
Conclusão
Referências

RESUMO - A destinação dos resíduos sólidos se configura como um dos grandes problemas enfrentados pela sociedade atual. No Brasil, a maior parte dos resíduos sólidos urbanos coletados segue para disposição em aterros sanitários, tendo registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década. Por outro lado, a quantidade de resíduos que segue para unidades inadequadas (lixões e aterros controlados) também cresceu, passando para pouco mais 29 milhões de toneladas por ano. Ferramentas computacionais, como *softwares* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), fornecem suporte para discriminar áreas potenciais para instalação de aterros sanitários, de maneira mais rápida e eficiente. A maioria dos projetos desenvolvidos em SIG tem como principal argumento a união de dados espaciais, realizar previsões por meio de modelos matemáticos e proporcionar apoio nas decisões. Dentre os métodos matemáticos mais utilizados em análises multicritério estão as abordagens booleana e *fuzzy*. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo comparar a metodologia booleana e *fuzzy* a fim de discriminar qual é mais indicada para apontar áreas à instalação de um aterro sanitário no Município de Campina Verde (MG). A metodologia desse estudo, consistiu na aplicação das abordagens booleana e *fuzzy* a fim de comparar qual apontaria uma área mais apta a instalação de um aterro sanitário. A conclusão do estudo caracteriza as técnicas de geoprocessamento uma ferramenta eficaz e de baixo custo, e o emprego da lógica *fuzzy* simplifica a aquisição da base de conhecimento, revelando-se bastante útil e precisa.

Palavras-chave: Aterro sanitário. Lógica booleana. Lógica *fuzzy*. Resíduos sólidos urbanos. Sistema de informações geográficas.

ABSTRACT - The destination of solid waste is configured as one of the major problems faced by today's society. In Brazil, most of the collected solid urban waste goes to disposal in landfills, having registered an increase of 10 million tons in a decade. On the other hand, the amount of waste that goes to inadequate units (dumps and controlled landfills) has also grown, to just over 29 million tons per year. Computational tools, such as Geographic Information Systems (GIS) software, provide support to discriminate potential areas for landfill installation, more quickly and efficiently. Most of the projects developed in GIS have as their main argument the union of spatial data, making predictions through mathematical models and providing support in decisions. Among the mathematical methods most used in multicriteria analysis are the Boolean and fuzzy approaches. In this context, the present work aims to compare the Boolean and fuzzy methodology in order to discriminate which is more suitable to point out areas for the installation of a landfill in the Municipality of Campina Verde (MG). The methodology of this study, consisted of the application of the Boolean and fuzzy approaches in order to compare which would indicate a more suitable area for the installation of a landfill. The conclusion of the study characterizes the geoprocessing techniques as an effective and low cost tool, and the use of fuzzy logic simplifies the acquisition of the knowledge base, proving to be quite useful and accurate.

Keywords: Landfill. Boolean logic. Fuzzy logic. Urban solid waste. Geographic information system..

INTRODUÇÃO

O aumento das sociedades de consumo reflete diretamente na produção de resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo Lopes & Silva (2020) a quantidade de RSU de um país está diretamente relacionada à evolução da sua população e ao poder de compra dos seus habitantes.

A destinação dos resíduos sólidos se configura como um dos grandes problemas enfrentados

pela sociedade atual (Lavor et al., 2017). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), entre 2010 e 2019, a geração de RSU no Brasil registrou considerável incremento, passando de 67 milhões para 79 milhões de tonelada por ano.

No Brasil, a maior parte dos RSU coletados segue para disposição em aterros sanitários,

tendo registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década. Por outro lado, a quantidade de resíduos que segue para unidades inadequadas (lixões e aterros controlados) também cresceu, passando para pouco mais 29 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2020).

A região sudeste é responsável pela geração de aproximadamente 50% dos resíduos sólidos no país (BNDES, 2014). Segundo o panorama da destinação dos RSU no estado de Minas Gerais, em dezembro de 2017, perto de 60% da população urbana, era atendida por sistemas de destinação final regularizados ambientalmente, em dezembro de 2018, esse índice aumentou para 61,87%. Porém, cerca de 38% da população ainda destina seus resíduos de maneira inadequada, ou seja, áreas que não possuem sistemas e medidas necessárias para proteção do meio ambiente.

A escolha de uma área para servir de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos deve atender aos critérios técnicos impostos pela norma ABNT NBR 8419 (1992). Porém, em muitos casos a administração municipal responsável pelo gerenciamento dos RSU comumente opta por áreas que possuem menor valor econômico e nem sempre são adequados sob o ponto de vista ambiental (Lopes & Silva, 2020).

Para Samizava et al. (2008), ferramentas computacionais, como *softwares* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), fornecem suporte para discriminar áreas potenciais para instalação de aterros sanitários, de maneira mais rápida e eficiente.

Para Pendock & Nedeljkovic (1996) a maioria dos projetos desenvolvidos em SIG tem como principal argumento a união de dados espaciais, com o objetivo de analisar e descrever

interações, realizar previsões por meio de modelos matemáticos e proporcionar apoio nas decisões.

Dentre os métodos matemáticos mais utilizados em análises multicritério estão as abordagens booleana e *fuzzy*. Na abordagem *fuzzy*, o raciocínio exato é interpretado como um processo de composição de relações nebulosas (Gomide, 1994). Para Câmara et al. (2001), o conjunto *Fuzzy* é uma metodologia de caracterização de classes, que por várias razões não tem ou não pode definir limites rígidos.

Um conjunto *fuzzy*, tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes, enquanto, em um conjunto booleano seus limiares são definidos de forma nítida (Câmara et al., 2001).

Na esfera da geotécnica ambiental, tem-se aplicado a modelagem *fuzzy* a diversas finalidades, dentre elas a escolha de áreas para aterros sanitários. Pois, para Zadeh (1965) a teoria do conjunto *fuzzy* é, em suma, o passo seguinte de aproximação à precisão da matemática clássica e à imprecisão do mundo real.

Segundo dados da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2019), o Município de Campina Verde está inserido no Território de Desenvolvimento Triângulo Norte e possui uma população urbana de 1.228.395 habitantes (IBGE, 2017). Sendo que, a disposição irregular é utilizada por 20,4% da população urbana do território.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo comparar a metodologia booleana e *fuzzy* a fim de discriminar qual é mais indicada para apontar áreas à instalação de um aterro sanitário no Município de Campina Verde (MG).

MODELAGEM NUMÉRICA

Lógica booleana

A lógica booleana apareceu durante o século XIX, que foi justamente uma das épocas de maior desenvolvimento da história da matemática desde os tempos da Idade da Grécia (Boylor, 1968). A definição desta lógica passa por diversos conceitos e leis definidas para expressar em termos algébricos uma forma de raciocínio humano.

Pelo ponto de vista booleano, um elemento está dentro ou fora de um dado conjunto. Os conjuntos são considerados como sistemas bivalentes com seus próprios estados alternando entre inclusão ou exclusão. Portanto, um elemento tem grau de pertinência 0 se não pertencer ao conjunto e grau

de pertinência 1 se o elemento pertencer ao conjunto.

Segundo Moreira et al. (2002) a álgebra booleana é uma estrutura algébrica que captura as propriedades essenciais dos operadores lógicos e de conjuntos, ou ainda oferece uma estrutura para se lidar com afirmações. Com base no Diagrama de Venn é possível observar a aplicação de operadores utilizados nesse tipo de algoritmo. Ele utiliza ferramentas lógicas AND (interseção), OR (união), NOT (negação) e XOR (exclusão) como representado na figura 1. Desta forma, os planos de informação classificados como restrições possuem caráter booleano e eliminam as áreas que, devido

às impossibilidades técnicas ou legais, não podem ser utilizadas para destinação de resíduos sólidos.

A fim de aplicar essa lógica, realizou-se a

classificação dos critérios com valores binários (0 ou 1) que serão apresentados como um dos resultados desta pesquisa.

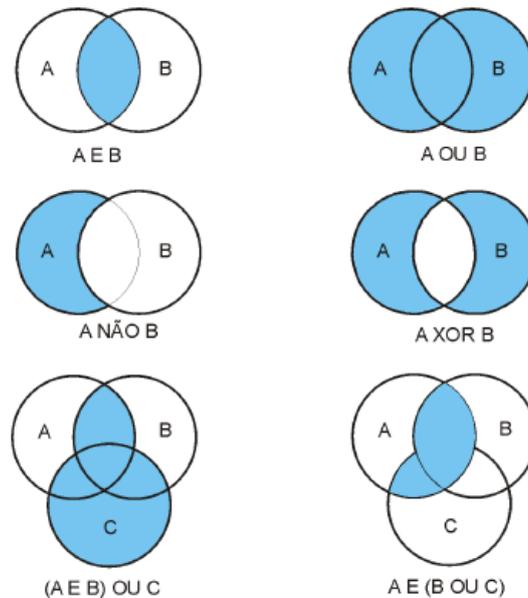


Figura 1 - Diagrama de Venn. (Fonte: Moreira et al., 2002).

Lógica fuzzy

O professor Lotfi Askar Zadeh em meados de 1960 percebeu que os métodos matemáticos tradicionais, disponíveis naquela época, não eram capazes de formalizar algumas situações referentes a problemas que compreendessem posições ambíguas, não completamente claras ou sem um contorno nítido (Silva, 2012).

Dessa forma, Zadeh propôs uma teoria de conjuntos, a qual denominou de teoria de conjuntos *fuzzy*, em que a bivalência não se empregava como habitualmente, na metade da década seguinte, ele sugeriu uma lógica não clássica, estruturada com

base na sua teoria de conjuntos, também não clássica. A expressão *fuzzy* tem sido traduzida para o português por “nebuloso” ou “difuso”. A figura 2 expressa a diferença de contorno entre um conjunto *fuzzy* e um conjunto booleano.

Segundo Takács (2004), o cérebro humano possui determinadas características especiais que permitem aprender a raciocinar em ambientes considerados vagos ou imprecisos. A Lógica *fuzzy* se destaca dela pela obtenção de uma conclusão vaga e imprecisa, deduzida de uma coleção de premissas, também imprecisas, representadas pelos conjuntos *fuzzy*.

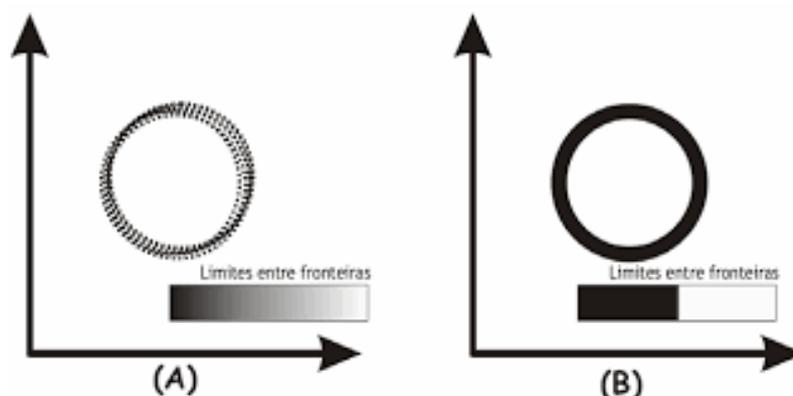


Figura 2 - Diferença entre o contorno Fuzzy (A) e booleano (B). (Modificado de Ruhoff et al., 2004).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

Campina Verde é um município brasileiro do estado de Minas Gerais, na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. Localiza-se a

uma latitude de 19°32'09" sul e a uma longitude de 49°29'09" oeste, estando a uma altitude de 532 metros.

Sua população, segundo dados do IBGE

(2010), é de 19.324 habitantes, e com população estimada para 2020 de 19.752 habitantes. O município conta com a área territorial de 3.650,749 km². A figura 3 demonstra a posição geográfica do município no estado de Minas

Gerais.

A região de Campina Verde apresenta clima tropical quente e úmido e o período seco é de abril a setembro e a estação seca coincide com o mês mais frio (Franco & Rosa, 1998).

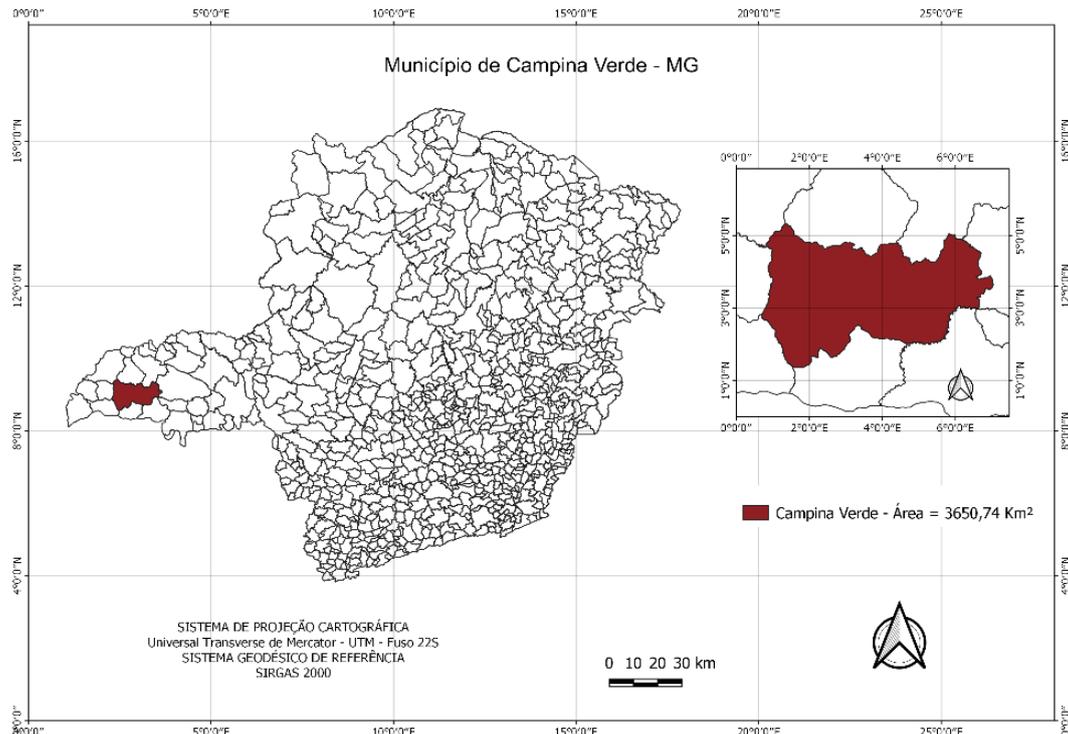


Figura 3 - Localização do município de Campina verde - MG.

Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram

utilizados os materiais descritos na tabela 1, bem como sua aplicação.

Tabela 1 – Descrição dos materiais e sua aplicação.

Materiais Usados	Aplicação
<i>Software de geoprocessamento QGis</i>	Processamento e criação dos Mapas
Dados espaciais de limites municipais –IEDE/2017	Criação Mapa limite municipal
Dados espaciais de solos – EMBRAPA/2016	Criação Mapa de pedologia
Dados espaciais Trechos rodoviários DEER 2011 – IEDE	Criação Mapa malha rodoviária municipal

Métodos

Modelagem Booleana

A atribuição de valores binários, sendo 0 para critérios com baixa pertinência ou restrito e 1 para critérios pertinentes foi realizada de forma subjetiva, embasada em diversos autores e nas normativas sobre o tema, chegando à seguinte formatação (Tabela 2).

Foram atribuídos os valores binários, 1 para critérios favoráveis e 0 para critérios restritos ou inaptos.

Segundo Oliveira Neto (2011), a preocupação com a distância entre a fonte geradora de resíduos sólidos urbanos e a área onde será implantado o aterro sanitário merece grande destaque, pois pode inviabilizar o empreendi-

mento. Portanto, as áreas situadas com distância inferior a 50 metros e superior a 1.000 metros foram consideradas áreas inaptas. As áreas situadas entre 100 metros e 1.000 metros foram classificadas como favoráveis.

Quanto às distâncias de cursos d'água, considerando Santos & Girardi (2007), qualquer indústria potencialmente poluidora deve ficar localizada a uma distância mínima de 200 m dos recursos hídricos ou cursos d'água mais próximos. Sendo assim, áreas localizadas a uma distância inferior a 200 metros foi classificada como inapta, recebendo o valor binário 0. Áreas localizadas a distância superior a 200 metros foi classificada como favorável e recebendo o valor binário 1.

Tabela 2 – Critérios e valores de análise. Fonte: Lopes & Silva (2020).

Mapas	Classes	Notas
Área de Segurança Aeroportuária	< 20000	0
	>20000	1
Pedologia	Latossolo	1
	Argissolo	0
	Gleissolo	0
Declividade	< 3%	0
	3 a 8%	1
	8 a 20%	1
	>45%	0
Estradas	≤ 50 m	0
	(50,100] m	1
	(100,500] m	1
	(500,1000] m	1
	> 1000m	0
Curso d'água	≤ 200m	0
	>200m	1
Área Urbana	≤ 2000m	0
	> 2000m	1

Os valores binários atribuídos para pedologia e declividade foram definidos considerando o grau de fragilidade do terreno, sendo o valor 1 para terrenos com baixa susceptibilidade a degradação e valor 0 para terrenos susceptível a degradação.

Áreas de segurança aeroportuária (ASA), é a área circular do território de um ou mais municípios, definida a partir do centro geométrico da maior pista do aeródromo, com 20 km de raio, cujos uso e ocupação estão sujeitos a restrições especiais em função da natureza atrativa de fauna. Sendo assim, foi atribuído o valor binário 0 para áreas dentro do raio de abrangência da ASA e o valor binário para áreas fora de tal raio.

O valor binário 0 foi atribuído a fatores restritivos, ou seja, para fatores que impossibilitariam o estabelecimento de um aterro sanitário, sendo eles: distância de vias inferiores a 50 metros ou superiores a 1.000 metros, distância de cursos d'água inferior a 200 metros, distância de áreas urbanas inferiores a 2.000 metros, declividades inferiores a 3% e superiores 45% e solos

passíveis a degradação.

Modelagem Fuzzy

A modelagem utilizando lógica *fuzzy* foi realizada em todas as variáveis avaliadas, sendo aplicada uma função matemática para cada uma delas. As equações (1) e (2) foram utilizadas para modelagem e propostas por Eastman (1997), sendo a equação (1) uma equação sigmoide crescente e a equação (2) uma sigmoide decrescente.

$$\mu = \cos^2\left(1 - \left(\frac{x-a}{b-a}\right)\right) \times \frac{\pi}{2} \quad \text{se } x > b, \mu = 1 \quad (1)$$

$$\mu = \cos^2\left(\frac{x-c}{d-c}\right) \times \frac{\pi}{2} \quad \text{se } x < c, \mu = 1 \quad (2)$$

Onde, a, b, c e d são pontos de controle atribuídos para cada variável analisada apresentado na tabela 3, e o valor de entrada da função é representado pela variável x.

Na tabela 3 são elencados todos os critérios utilizados no presente trabalho e suas respectivas funções, assim como os pontos de controle adotados para cada função.

Tabela 3 – Modelagem *Fuzzy*

Critério	Função	Pontos de Controle			
		a	b	c	d
Declividade	Sigmoide decrescente			10	30
Rede viária	Sigmoide simétrica	0	100 0	200 0	300 0
Cursos D'água	Sigmoide crescente	200	500	-	-
Mancha Urbana	Sigmoide crescente	1500	200 0	-	-
Segurança Aeroportuária	Linear decrescente	2000 0	0	-	-

O critério declividade foi modelado por meio de uma função sigmoide decrescente pois a adequabilidade da área diminuir com o aumento da declividade. Os pontos de controle foram 10 e 30%, sendo de 1 a 10% o mais adequado possível, decrescendo até 30%, em que a adequabilidade é nula. Vale ressaltar ainda que a ABNT NBR 13.896 (1997) indica que entre 0 e 1% a adequabilidade deve ser nula, visto que a área para implantação de um aterro sanitário deve possuir declividade entre 1 e 30%.

O critério de rede viária, foi modelada utilizando uma função sigmoide simétrica. Existe a falta de valores definidos por legislação, e a ABNT NBR 13.896 (1997) diz apenas que deve haver facilidade no acesso ao aterro sanitário. Para a distância de 0 metro foi atribuído um valor nulo, por ser a própria via. Para locais acima de 1000 metros de uma rede viária se atribuiu o máximo valor de adequabilidade em virtude da distância de um aterro possuir custos de implantação baixos não afetando os usuários da estrada. Esse valor máximo será constante até a distância de 2000 metros. Por fim, distâncias

acima de 2000 metros diminui sua adequabilidade em função dos altos custos com transporte, e dessa forma o último ponto de controle adotado foi o de 3000 metros, que torna a adequabilidade nula.

Na modelagem da distância das áreas urbanizadas foi utilizada uma função sigmoide crescente com pontos de controle de 1500 e 2000 metros, respectivamente. Segundo a ABNT NBR 13.896 (1997), o aterro sanitário deve estar localizado a uma distância mínima de 1500 metros de núcleos populacionais.

Para a distância dos cursos d'água modelou-se a partir de uma função sigmoide crescente, dado que a adequabilidade aumenta proporcionalmente à distância do corpo hídrico. De acordo com a ABNT NBR 13.896 (1997) a distância mínima deve ser de 200 metros.

Para as áreas pertencentes a ASA, modelou-se utilizando uma função linear decrescente, uma vez que a Resolução nº611 de 09 de março de 2021, define que uso e ocupação da ASA está sujeito a restrições especiais em função da natureza atrativa de fauna.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os aterros sanitários são importantes pois solucionam parte dos problemas causados pelo excesso de lixo gerado nas grandes cidades. E ainda é a forma ambientalmente correta de disposição de resíduos.

Intervir eficazmente através de um processo de auxílio à escolha de áreas para implantação de um aterro sanitário não significa apenas utilizar-se de dados corretos, mas, sobretudo, obter um modelo de raciocínio capaz de traduzi-los em informações capazes de subsidiar as decisões envolvidas neste processo (Born, 2013).

Após a estruturação e padronização dos mapas temáticos dos fatores utilizados para definição das áreas aptas para instalação de aterro sanitário, desenvolveu-se uma regra de decisão para alcançar os objetivos do estudo. Portanto, o geoprocessamento se caracteriza como um instrumento de redução da subjetividade no processo de decisão, no qual é possível atribuir pesos aos fatores considerados na análise.

Os mapas de declividade emergem como uma ferramenta de vital importância para a análise do relevo, sendo uma forma de representação temática da distribuição espacial dos diferentes níveis de inclinação existentes em um terreno amparando a análise da paisagem (Colavite &

Passos, 2012). Os mapas pedológicos apresentam a distribuição espacial dos solos, tendo assim informações dos recursos naturais de uma dada área. Nesse aspecto, a pedologia tem um papel fundamental no entendimento dos fatores de formação do solo e da sua fragilidade. A extensão territorial do município é composta por um relevo plano a suave-ondulado e solos bem estruturados como apresentado na figura 4.

No Cerrado, os Latossolos ocupam praticamente todas as áreas planas a suave-onduladas, sejam chapadas ou vales. Ocupam ainda as posições de topo até o terço médio das encostas suave-onduladas, típicas das áreas de derrames basálticos e de influência dos arenitos (Sousa, 2021).

O acesso principal à região, a partir de Belo Horizonte, dá-se pela rodovia BR-262. O segundo caminho leva à cidade de Uberlândia através da BR-452, onde toma-se a BR-497 até Campina Verde, que juntamente com as vias municipais, constituem a malha viária do município.

A região de Campina Verde está totalmente inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Grande, mas apresenta drenagens da sub-bacia do Rio Verde. Os principais afluentes do Rio Verde são os ribeirões Fortaleza e Areias.

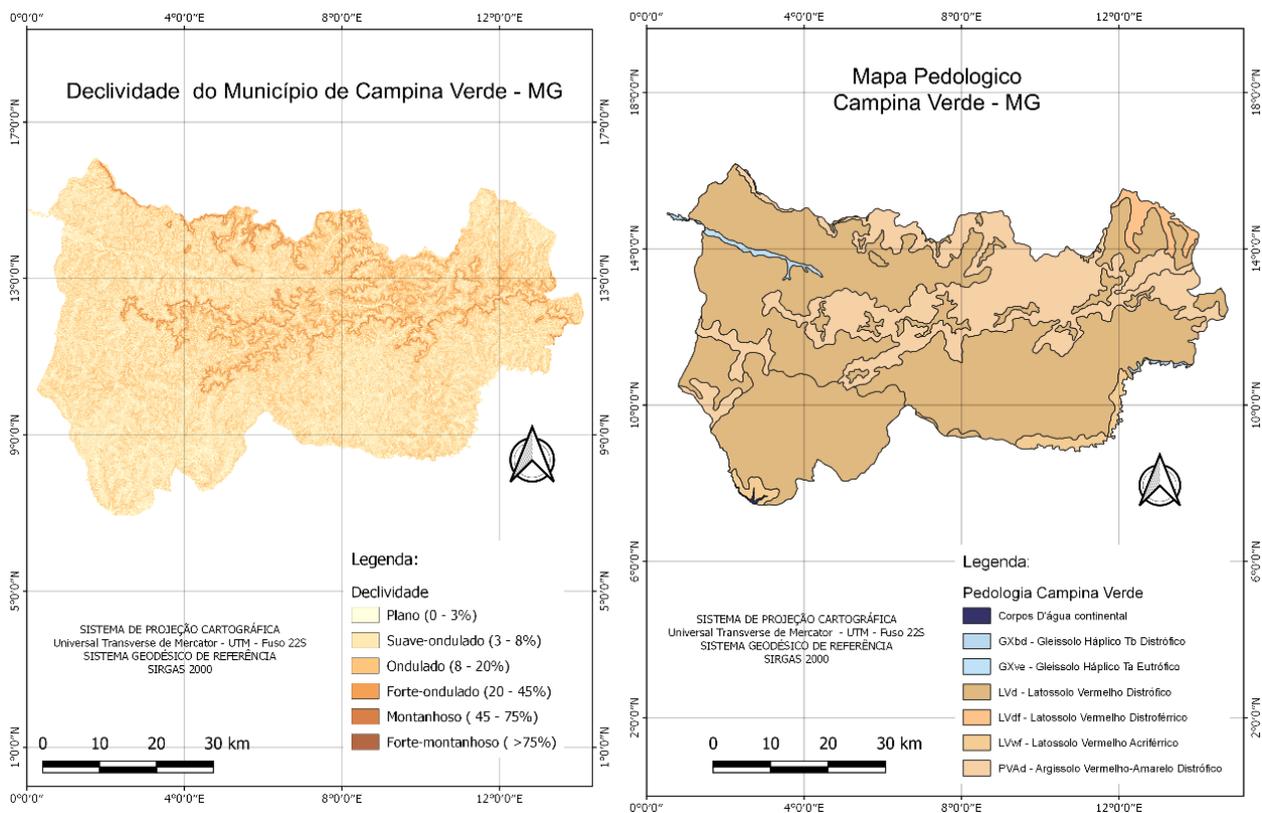


Figura 4 – Mapa temático de declividade e de pedologia.

Já as principais drenagens que se dirigem diretamente ao Rio Grande são os ribeirões da

Moeda, cachoeira de Cima, São Mateus e do Marimbondo (Figura 5).

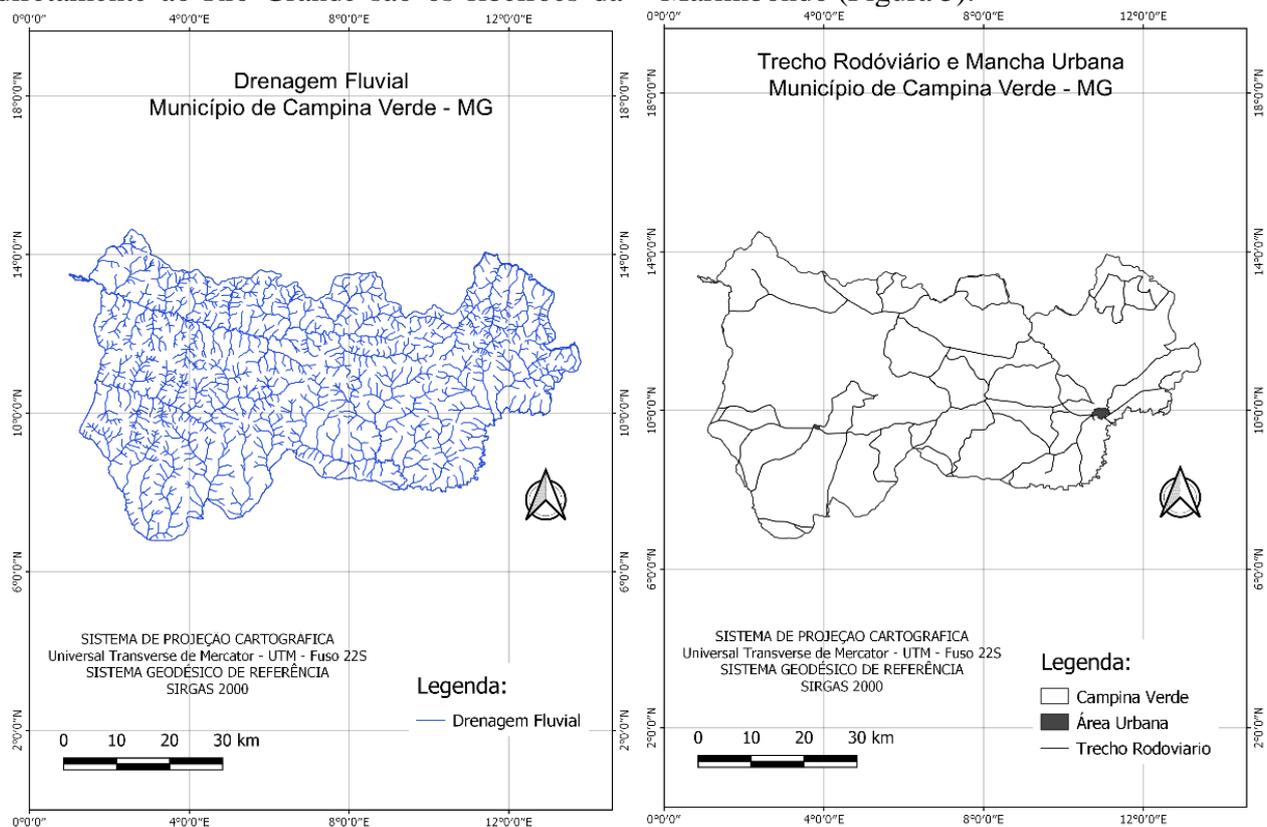


Figura 5 – Mapas temáticos da Drenagem Fluvial e da malha rodoviária.

O município é abrangido por dois raios de ASA (Figura 6), que apresentam seu centro geométrico nos municípios de Iturama e Santa Vitória. Tais áreas apresentam jurisdição do

Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I).

Com os critérios modelados, utilizou-se a ferramenta Calculadora Raster do SIG QGIS

‘Madeira’ – versão 3.4.12, que possibilita a gerado um mapa de aptidão onde se compilou as aplicação das lógicas booleana e *fuzzy*. Foi modelagens booleana e *fuzzy* (Figura 7).

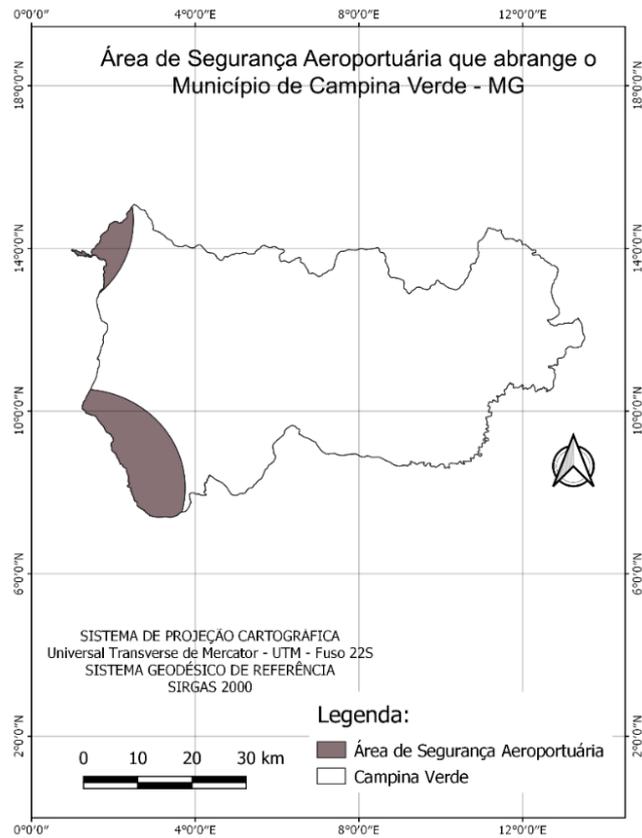


Figura 6 – Mapa temático Área de Segurança Aeroportuária do Município de Campina Verde – MG.

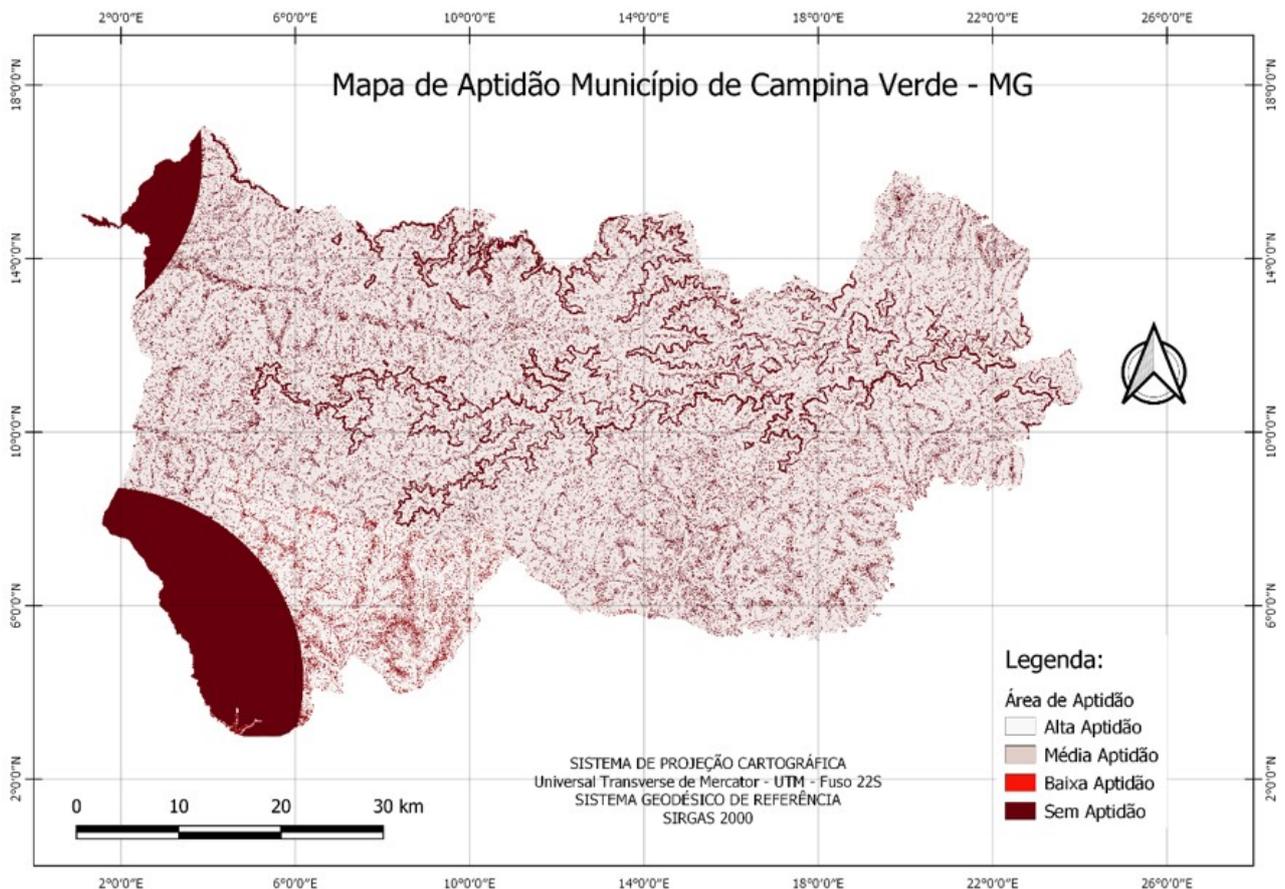


Figura 7 – Mapa de Aptidão do Município de Campina Verde – MG.

O mapa de aptidão do município de Campina Verde – MG, apresentou uma alta aptidão em terrenos de Latossolos e com baixa declividade. Normalmente Latossolos são profundos e bem drenados. A modelagem booleana apresentou baixa aptidão em terrenos de Argissolos, destoando assim da modelagem *fuzzy* que não acusou tal área. No Brasil, o termo “solo frágil” com frequência designa solos com elevado risco a degradação principalmente por ação antrópica (Albuquerque et al., 2015). Na engenharia sanitária e ambiental designa solos com baixa capacidade de suporte de resíduos, com potencial de toxicidade e risco de poluição dos recursos hídricos (Olson, 1973).

Os Argissolos são solos profundos e muito profundos, bem estruturados e bem drenados. Porém, Argissolos de textura arenosa/média ocorrem em condições de relevo desde relativamente suavizado a mais ondulado, por sua natureza pouco coesa em superfície e menor permeabilidade nos horizontes subsuperficiais apresentam elevada susceptibilidade à erosão.

A lógica *fuzzy* é uma variação da lógica booleana, que só apresenta os valores “0” e “1”, sem nenhum termo médio. Entretanto, na lógica *fuzzy*, uma premissa pode assumir graus de

verdade intermediários, assim, é possível descrever grandezas imprecisas como o solo que é resultado de uma complexa interação de inúmeros fatores, como o clima, organismos e topografia.

As regiões sem aptidão em ambas modelagens se deram em terrenos com uma declividade ondulada (8% a 20%) a forte-ondulado (20% a 45%) não atendendo assim a norma brasileira, as duas modelagens tiveram as regiões abrangidas pela ASA como áreas sem aptidão, seguindo assim a Resolução N° 611 da ANAC (2021), devido a estas áreas estarem sujeitas a uso e ocupação com restrições especiais à implantação de atividades com natureza atrativa de fauna, impossibilita assim a implantação de um aterro sanitário em tais áreas; e em regiões de Gleissolos, que são solos minerais e hidromórficos. Segundo Oliveira Neto (2011) os Gleissolos compreendem solos mal a muito mal drenados e devido à presença de lençol freático elevado e ao risco de inundações ou alagamentos frequentes, sendo assim inadequado para a instalação de um aterro sanitário.

As áreas aptas à instalação de aterro sanitário obtidas através das avaliações por lógica booleana e lógica *fuzzy* são, portanto, apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Área aptas para instalação de Aterro Sanitário.

Aptidão	Área Total modelagem booleana (Km ²)	Área Total modelagem <i>Fuzzy</i> (Km ²)	Área Total lógicas combinadas (Km ²)
Sem aptidão	7,52	521,46	843,01
Baixa	909,48	106,01	103,69
Média	809,10	2975,92	2.273,37
Alta	1924,64	47,35	430,67
Total	3.650,74	3.650,74	3.650,74

A área com alta aptidão apresentada após a aplicação da lógica booleana foi de 1.924,64 Km² e para a lógica *fuzzy* foi de 47,35 Km². Enquanto áreas sem nenhuma aptidão foi de 7,52 km² para a lógica booleana e de 521,46 Km² para a lógica *fuzzy*, apresentando assim uma grande discrepância nas áreas de aptidão para os dois métodos. A área com alta aptidão apresentada após a aplicação das modelagens booleana e *fuzzy* foi de 430,67 Km². Enquanto áreas sem nenhuma aptidão foi de 843,01 km² após a aplicação da modelagem booleana e *fuzzy* combinadas.

Segundo Samizava et al. (2008), a lógica booleana possibilita modelar restrições com variações abruptas no domínio e contradomínio, enquanto os conjuntos *fuzzy* tratam de maneira mais realística os conceitos imprecisos e subjetivos, que são comuns nas análises do meio físico.

As análises baseadas no conceito *fuzzy*, ao contrário das análises booleanas convencionalmente disponíveis na maior parte dos SIG, não segmentam cada variável em apta e não apta ao fim pretendido, mas permite transformá-las em escores de aptidão que mantém toda a variação espacial original. Ademais, as variáveis podem equilibrar umas às outras durante a agregação para a obtenção do mapa final de aptidão ao propósito que se busca. Um alto escore de aptidão de uma variável em um determinado local pode compensar uma baixa contagem de aptidão de outra variável no mesmo local, resultando em uma contagem ponderada no resultado.

Em uma análise booleana uma aptidão baixa em qualquer uma das variáveis utilizadas fatalmente levaria à exclusão do local, mesmo que todas as demais apresentem a aptidão elevada.

CONCLUSÃO

O geoprocessamento de imagens é uma maneira rápida e de baixo custo que possibilita localizar áreas favoráveis à instalação de aterro sanitário. A disponibilidade de imagens de satélite e de dados sobre a região se torna um dos únicos pré-requisitos para a utilização da técnica.

A seleção de áreas para o estabelecimento de aterros sanitários permite declarar que não há um método padrão, adequado a todas as realidades. Só é possível estabelecer regras rígidas para classes de parâmetros para a seleção de áreas quando há legislação específica.

O atrativo da lógica booleana está em sua simplicidade, em um primeiro momento o modelo booleano pode ser útil, para determinar áreas de possível instalação, porém não é determinante por si só, uma vez que as áreas escolhidas não apresentam um grau de confiabilidade. Já que não é possível descrever a realidade utilizando apenas os extremos, verdadeiro ou falso. Na lógica booleana não existe “meio-termo”, entre-

tanto, nosso raciocínio usa esse “meio-termo” na tomada de decisões.

Já o emprego da lógica *fuzzy* simplifica a aquisição da base de conhecimento, revelando-se bastante útil e precisa. Sendo assim, a ampla flexibilidade da lógica *fuzzy* simplifica a solução de problemas. Conjuntos baseados em lógica nebulosa são mais fáceis de entender, são robustos e podem atuar com falta de regras ou com regras defeituosas.

Portanto, para o estudo de caso do município de Campina Grande (MG) a modelagem utilizando a combinação das lógicas booleana e *fuzzy* se demonstrou confiável. Sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros a continuidade desta pesquisa, utilizando outros parâmetros como localização e cadastro dos poços de abastecimento urbano e rural, localização e sedes de indústrias rurais, além da realização de um trabalho de campo para confrontar os resultados modelados.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo: ABRELPE, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **RESOLUÇÃO Nº 611, DE 9 DE MARÇO DE 2021.** 2021. Disp. em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-611-de-9-de-marco-de-2021-308360385>. Acesso em: 14 dez. 2021.
- ALBUQUERQUE, J.A.; DE ALMEIDA, J.A.; GATIBONI, L.C.; ROVEDDER, A.P.; COSTA, F.D.S. Fragilidade de Solos: uma análise conceitual, ocorrência e importância agrícola para o Brasil. In: CASTRO, Selma Simões de. **SOLOS FRÁGEIS: Caracterização, manejo e Sustentabilidade.** Brasília: Embrapa, 2015. Cap. 1. p. 25-50.
- BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão.** 2. ed. Jabotão dos Guararapes: BNDES, UFPE, 2014.
- BORN, V. **Avaliação da Aptidão de Áreas para Instalação de Aterro Sanitário com Uso de Ferramentas de Apoio à Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios.** Lajeado, 2013. 103 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário Univates.
- BOYLER, C.B. **História da Matemática.** Nova Iorque, Dover, 1968.
- CÂMARA, G.; MOREIRA, F.R.; BARBOSA, C.; ALMEIDA FILHO, R.; BÖNISCH, S. Técnicas de Inferência Geográfica. In: CÂMARA, Gilberto. **Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001. 9, p. 1-48.
- COLAVITE, A.P. & PASSOS, M.M. Integração de mapas de declividade e modelos digitais tridimensionais do relevo na análise da paisagem. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 4, p. 1547-1559, 2012.
- EASTMAN, R. **IDRISI for windows: user's guide.** version 2.0 Worcester: Clark University, 1997.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Panorama da destinação dos resíduos sólidos urbanos no Estado de Minas Gerais em 2018.** Belo Horizonte: FEAM, 2019. 135 p.
- FRANCO, J.B.S. & ROSA, R. Zoneamento agrícola do Município de Campina Verde-MG, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, IX. Santos. 1998. **Anais...**Santos: INPE, 1998, 561-572.
- GOMIDE, F.A.C. & GUDWIN, R.R. **Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy.** SBA Controle & Automação, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994. Disp. em: <https://pdfs.semanticscholar.org/c4ea/4484bdd2449053d7b7384b05c0e2def86449.pdf>. Acesso em: 2021.
- LAVOR, A.A.A.; DA SILVA, A.C.A.; RIBEIRO, M.E.O.; TURATTI, L. Conflitos Causados pelos Lixões: uma análise comparativa da situação do Brasil com o município de Iguatu-CE. **Id On Line Revista de Psicologia**, v. 11, n. 37, p. 246-258, 30 set. 2017.
- LOPES, R.C. & SILVA, R.N.F. Uso de lógica booleana na triagem de áreas aptas para a implantação de aterro sanitário no Município de Campina Verde, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 16, p. 487-499, 2020.
- MOREIRA, F.R.S.; BARBOSA, C.; CÂMARA, G.; ALMEIDA FILHO, R. Inferência Geográfica e Suporte à Decisão. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos, 2002.
- OLIVEIRA NETO, J.T. **Determinação de áreas favoráveis à implantação de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos para o Município de Piumhi-MG.** (Monografia de especialização) Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

- OLIVEIRA NETO, M. B. *Gleissolo*. AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. 2011. Disp. em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7k02wx7ha087apz2kfhpkns.html>. Acesso em: 21 mar. 2021.
- OLSON, G.W. Improving uses of soils in Latin America. *Geoderma*, Amsterdam, v.9, p. 257-267, 1973.
- PENDOCK, N. & NEDELJKOVIC, V. Integrating geophysical data sets using probabilistic methods. In: Thematic Conference and Workshop on Applied Geologic Remote Sensing, 11, Las Vegas, 1996. *Proceedings...* Nevada: 1996, v.2, p.621-628.
- RUHOFF, A.L.; SOUZA, B.S.P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R.S. Lógica Fuzzy e Zoneamento Ambiental da Bacia do Arroio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XII Goiânia, 2005. *Anais...* Goiânia: INPE, 2005, p.2355-2362.
- SAMIZAVA, T.M.; KAIDA, R.H.; IMAI, N.N.; NUNES, J.O.R. SIG aplicado à escolha de áreas potenciais para instalação de aterros sanitários no Município de Presidente Prudente-SP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 60, n. 1, p. 43-55, 2008.
- SANTOS, J.S. & GIRARDI, A.G. Utilização de geoprocessamento para localização de áreas para aterro sanitário no Município de Alegre. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII*, Florianópolis, 2007. *Anais...* Florianópolis: INPE, 2007.
- SILVA, A.A. Sobre Raciocínios Aproximados: O Caso “Fuzzy”. *Kínesis*, São Paulo, v., n. 7, p. 35-49, jul. 2012.
- SOUZA, D.M.G. *Latossolos*. Agência de Informação EMBRAPA - Bioma Cerrado. Disp. em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html. Acesso em: 19 fev. 2021.
- TAKÁCS, M. *Approximate Reasoning in Fuzzy Systems Based on Pseudo-analysis and Uninorm Residuum*. Edited by Bernard de Baets, János Fodor: Academia Press Gent, 2004.
- ZADEH, L.A. *Fuzzy sets. Information and control*, v. 8, p. 338-353, 1965.

*Submetido em 30 de setembro de 2021
Aceito para publicação em 2 de março de 2022*