

**USO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO BASEADA NO MÉTODO HÍBRIDO
AHP/TOPSIS PARA A IMPLANTAÇÃO DE INTERVENÇÕES DE PROGRAMAS
HIDROAMBIENTAIS: estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Doce**

*Use of Multi-Criteria Analysis based on the AHP / Topsis Hybrid Method for Implementing
Interventions of Hydroenvironmental Programs: a study case about Rio Doce hydrographic
basin*

Alex Cardoso Pereira^{1*}

Bruno Augusto de Rezende²

Fabiano Henrique da Silva Alves³

André Luís de Paula Marques⁴

Luciana Figueiredo Silva⁵

Vítor Soares Feitoza⁶

Héverton Ferreira Rocha⁷

¹ Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Civil pela UFV. Especialista em Avaliação de Risco e Perícia Ambiental pela UFV. Engenheiro Ambiental e Sanitarista pelo Centro Universitário de Caratinga (UNEC) – e-mail: alex.c.pereira@ufv.br * Autor correspondente.

² Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Especialista em Gestão da Inovação Corporativa pela UNYLEYA. Especialista em Gestão de Projetos pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER). Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela UNEC – e-mail: rezende.amb@gmail.com

³ Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos pela UNIFEI. Especialista em Gestão Normativa de Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Especialista em Gestão Agroindustrial pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Engenheiro Agrônomo e Engenheiro de Segurança do Trabalho pela Universidade Vale do Rio Doce (UNIVALE) – e-mail: fabianohsalves@gmail.com

⁴ Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Paulista (Unesp). Mestrado em Engenharia Mecânica pela Unesp. Graduação em Engenharia Mecânica pela Unesp – e-mail: andre.marques@agevap.org.br

⁵ Mestre em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes). Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) – e-mail: lufigueiredobio@gmail.com
Mestrando em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos pela UNIFEI. Especialista em Geoprocessamento e Georreferenciamento pela Universidade Cândido Mendes (UCAM). Engenheiro Ambiental e Sanitarista pelo Centro Universitário de Caratinga (UNEC) – e-mail: vitor.feitoza@codex.com.br

⁷ Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UNEC. Especialista em Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos e Engenharia de Avaliações e Perícias pela UNYLEYA. Engenheiro Civil e Ambiental e Sanitarista pela UNEC – e-mail: rocha.heverton@gmail.com

RESUMO

O estudo visou o desenvolvimento de um modelo de decisão multicritério para hierarquizar os imóveis rurais contemplados pela Iniciativa RIO VIVO da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Foi desenvolvido um modelo híbrido composto pelas ferramentas *Analytic Hierarchy Process (AHP)* – utilizada para determinação dos pesos dos critérios; e *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* – utilizada para a hierarquização dos imóveis rurais. O modelo foi aplicado na hierarquização de 52 imóveis rurais de uma microbacia hidrográfica do município de Mariana. Foram selecionados 12 critérios para hierarquização, que contemplaram os programas de proteção de nascentes (P52) e expansão do saneamento rural (P42). O painel para determinação dos pesos dos critérios foi realizado com os técnicos envolvidos com a elaboração da Iniciativa RIO VIVO, sendo que a taxa de consistência da matriz de julgamento foi de 4,0% e o grau de consenso do grupo foi de 80,9%. Os critérios “Quantidade de nascentes” e “Localização na microbacia” foram os que obtiveram a maior ponderação no painel. Os imóveis rurais localizados nos terços alto e médio obtiveram as primeiras colocações da hierarquização, sendo esses os prioritários na implantação das intervenções. O modelo desenvolvido promove uma adequada implantação dos recursos oriundos da cobrança do uso da água, auxiliando os gestores na tomada de decisão, uma vez que prioriza os imóveis rurais, otimiza a logística e reduz os custos de implantação das intervenções hidroambientais, de acordo com as características dos locais de implantação.

Palavras-chave: Iniciativa RIO VIVO. Tomada de decisão. Imóveis rurais.

ABSTRACT

The purpose of the study was to develop a multicriteria decision model to rank rural properties covered by RIO VIVO Initiative in the Rio Doce Hydrographic Basin. It was developed a model consisting of the Analytic Hierarchy Process (AHP) tools – used to determine the weights of the criteria; and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) – used to rank rural properties. The model was applied to hierarchize 52 rural properties in a watershed in Mariana. Twelve criteria were selected for ranking, which included programs for protection of springs (P52) and expansion of rural sanitation (P42). The panel to determine the weights of criteria was carried out together with technicians involved in developing RIO VIVO Initiative. The consistency rate of the judgment matrix was 4.0% and the degree of consensus of the group was 80.9 %. Quantity of river springs and location in the microbasin were criteria that weighted the most. The rural properties located in high and middle thirds were ranked in the first positions, being priority in the implementation of interventions. The model developed promotes an adequate implementation of resources coming from water use charge, helping decision-makers once it prioritizes rural properties, optimizes logistics and reduces costs of implementing hydroenvironmental interventions, in accordance with characteristics of the sites where implementation shall take place.

Keywords: RIO VIVO Initiative. Decision-making. Rural properties.

Data de submissão: 30/10/2021

Data de aprovação: 02/05/2022

1 INTRODUÇÃO

A utilização desordenada dos recursos hídricos, observada no Brasil nos últimos anos, tem gerado uma progressiva deterioração dos equilíbrios ecossistêmicos. A crescente degradação da qualidade e quantidade da água têm ocasionado problemas reais de escassez, comprometimento de setores produtivos e até mesmo o abastecimento de cidades, elevando custos de tratamento e a necessidade do uso de sistemas de transporte de água a longas distâncias para abastecimento urbano (MIRANDA *et al.*, 2021).

Historicamente, a Bacia Hidrográfica do Rio Doce tem sido afetada pelo lançamento de esgoto doméstico não tratado nos cursos d'água, pela geração de sedimentos ocasionada pelo desmatamento e pelo mau uso do solo, e pelo rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, em 2015 (HATJE *et al.*, 2017; RICHARD *et al.*, 2020; BORGES, EZEZINOS e VIEIRA, 2020; JANKOWSKY *et al.*, 2021).

De acordo com Barcelos *et al.* (2013), as bacias hidrográficas devem ser consideradas áreas preferenciais de planejamento ambiental e de conservação, pois são as principais responsáveis pelo equilíbrio dos ecossistemas, independentemente de sua extensão espacial. Por estarem inseridas na Teoria Geral dos Sistemas, as bacias hidrográficas se caracterizam por serem um sistema energeticamente aberto, com entradas e saídas de energia, interligados com o meio físico e socioambiental, porém, sob um atual desequilíbrio dinâmico no seu ciclo natural, gerando impactos ambientais que chegam a atingir escalas locais e até regionais.

De acordo com a Constituição Brasileira e com a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), a água é considerada um bem econômico de domínio público, indispensável, tanto na sua quantidade quanto qualidade, para a manutenção da vida e da saúde humana (BRASIL, 1988, 1997). A Política Nacional de Recursos Hídricos considera, ainda, a bacia hidrográfica como a unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Para garantir a proteção e o uso racional da água, a PNRH determinou como instrumento a cobrança pelo uso dos recursos hídricos (BRASIL, 1997). Conforme Vilarinho

et al. (2021), Os valores arrecadados devem ser aplicados prioritariamente na bacia hidrográfica em que foram gerados, mediante o princípio água-paga-água, e deverão ser utilizados no financiamento de estudos, programas, projetos e obras incluídos nos Planos de Recursos Hídricos da respectiva bacia hidrográfica.

Uma vez que as obras que envolvem recursos hídricos, como as obras de saneamento básico e segurança hídrica, requerem grandes volumes de recursos financeiros, não há disponibilidade financeira suficiente para a execução de todos os projetos ao mesmo tempo (CAMPOS, CAZARINE e CAMPOS, 2020). Desta forma, é necessário estabelecer um processo decisório para realizar as escolhas mais viáveis, do ponto de vista técnico e logístico.

A tomada de decisão considerando muitas variáveis é uma realidade em um contexto em que os problemas se tornam cada vez mais complexos, ao mesmo tempo que mais dados se tornam disponíveis (PIMENTA *et al.*, 2019). Sendo assim, as ferramentas de análise multicritério são importantes instrumentos de modelagem para elaboração de projetos de localização ou disposição espacial mais adequada de ações e reabilitação ambiental de bacias hidrográficas.

A análise multicritério tem sido amplamente utilizada para auxílio à tomada de decisão em projetos de recuperação ambiental. O estudo de Catelani *et al.* (2012) desenvolveu um modelo para determinação de áreas prioritárias para o restabelecimento da cobertura florestal, apoiada no uso de geotecnologias. Saito *et al.* (2016) realizaram o diagnóstico e análise da conectividade estrutural da paisagem fragmentada no entorno da Unidade de Conservação Reserva Particular de Patrimônio Natural Cafundó (Cachoeiro do Itapemirim/ES), propondo a restauração por Corredores Ecológicos por meio de análise multicritério.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Doce, Almeida *et al.* (2020) desenvolveram uma Análise de Decisão Multicritério (ADMC) baseada em Sistema de Informações Geográficas - SIG, e associada ao método do Processo Analítico Hierárquico (AHP) e Combinação Linear Ponderada (CLP) para mapear áreas prioritárias para recuperação florestal na porção mineira da bacia hidrográfica.

Na literatura não existe um modelo para auxílio à tomada de decisão para hierarquizar áreas prioritárias para implantação de intervenções hidroambientais. No caso da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, os critérios para escolha das áreas beneficiadas com os programas custeados com a cobrança dos recursos hídricos foram definidos no Plano de Aplicação Plurianual – PAP 2016/2020 (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO

DOCE - CBH DOCE, 2015). Entretanto, o PAP não estabeleceu uma ponderação para os critérios, o que propicia subjetividade na escolha das áreas.

O objetivo deste artigo foi desenvolver um modelo de decisão multicritério para hierarquizar os imóveis rurais contemplados pela Iniciativa RIO VIVO da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, para concretizar as ações propostas pelo Plano de Recursos Hídricos.

2 INICIATIVA RIO VIVO

A Iniciativa RIO VIVO é o nome atribuído à implementação conjunta de três programas do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (PIRH-Doce): P12 – Programa de Controle de Atividades Geradoras de Sedimentos, P42 – Programa de Expansão do Saneamento Rural e P52 – Programa de Recomposição de Áreas de Preservação Permanentes (APPs) e Nascentes (CBH DOCE, 2010).

A implementação destes programas está sendo realizada por meio da execução de projetos em imóveis rurais localizados em microbacias de pontos de captação de água para abastecimento público em municípios priorizados e/ou hierarquizados pelos comitês de bacias hidrográficas afluentes do Rio Doce.

As atividades da Iniciativa RIO VIVO foram inauguradas durante o período de implementação do Plano de Aplicação Plurianual (PAP) da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, que é a ferramenta de planejamento e orientação para aplicação dos recursos financeiros arrecadados com a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, no período de 2016 a 2020. Neste período, foram contratadas empresas para a elaboração de diagnósticos e projetos para os imóveis rurais nas sub-bacias dos Rios Piranga, Piracicaba, Santo Antônio e Suaçuí.

Durante a estruturação do PAP para o horizonte 2021-2025, foram alocados recursos para a continuidade das ações da Iniciativa RIO VIVO, buscando aumentar a abrangência de atuação para as sub-bacias dos Rios Caratinga, Manhauçu e porção capixaba da Bacia do Rio Doce, bem como iniciar a execução dos projetos nos imóveis rurais por toda a bacia (CBH DOCE, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do modelo foi utilizado o método híbrido - AHP, *Analytic Hierarchy Process*, ou Processo Hierárquico Analítico e o TOPSIS - *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* ou Técnica de Preferência de Pedido por Similaridade à Solução Ideal, com a participação dos técnicos da entidade delegatária, equiparada à Agência de Águas para o CBH-Doce, em âmbito federal, e para seis comitês estaduais mineiros.

As informações referentes aos imóveis rurais foram obtidas por meio da análise dos diagnósticos ambientais compilados do município de Mariana/MG, elaborado pelo Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Piranga (CONSOMINAS ENGENHARIA, 2019).

No caso do município de Mariana, na microbacia selecionada para a atuação da Iniciativa RIO VIVO, foram diagnosticados 81 imóveis rurais. Contudo, apenas 52 imóveis estavam aptos a receberem um ou mais projetos hidroambientais financiados com os recursos da cobrança dos recursos hídricos.

Para esse estudo, foram analisadas as informações apenas dos 52 imóveis rurais que estavam habilitados a receberem as intervenções ligadas ao saneamento básico e à proteção de nascentes, propostas pela Iniciativa RIO VIVO.

3.1 Determinação dos critérios de hierarquização

A metodologia da priorização dos imóveis rurais, para a implantação das intervenções de conservação e reabilitação das microbacias hidrográficas, foi desenvolvida com base no diagnóstico e levantamento das principais vulnerabilidades, pressões e impactos detectados nos imóveis rurais.

A definição dos critérios de hierarquização considerou, no mínimo, os critérios definidos pelo Plano de Aplicação Plurianual da Bacia do rio Doce, sendo que eles foram utilizados como uma referência para determinação dos critérios de hierarquização.

O artigo 8º, inciso IV da Deliberação Ad Referendum nº 48 de 01 de dezembro de 2015 do PAP da Bacia do rio Doce determina que visando a otimização das ações, o Programa de Controle das Atividades Geradoras de Sedimentos (P12) e o Programa de Expansão do Saneamento Rural (P42) serão preferencialmente implementados em conjunto com o Programa

de Recomposição de APPs e Nascentes (P52) e nas mesmas áreas selecionadas para este programa (CBH DOCE, 2015).

A hierarquização dos estudos, planos, projetos e ações priorizados do PIRH/PARHs Doce, com espacialização por unidade de gestão de recursos hídricos, são atendidos com os seguintes critérios:

- Áreas onde há intensa erosão do solo;
- Áreas cujas nascentes se caracterizam como manancial de abastecimento público;
- Áreas de cabeceiras de cursos d'água, no sentido da nascente para a foz;
- Áreas no entorno de UC's;
- Regiões com ocorrência de eventos críticos de seca com desabastecimento humano e animal nas áreas rurais e redução da vazão de base em toda a bacia;
- Áreas com inserção ou proximidade de arranjos institucionais favoráveis a efetivar as parcerias para desenvolvimento do programa.

Para este estudo, foram selecionados apenas critérios relacionados aos Programas P42 (Expansão do Saneamento Rural) e P52 (Recomposição de APPs e nascentes).

Além dos critérios já estabelecidos no PAP da Bacia do rio Doce foram inseridos mais critérios para tornar a hierarquização mais focada na realidade da Iniciativa RIO VIVO, dentro das suas particularidades e limitações observadas nos diagnósticos ambientais dos imóveis rurais.

Na Tabela 1 são apresentados os critérios utilizados para a hierarquização dos imóveis rurais, bem como a justificativa para a utilização deles.

Tabela 1 – Importância relativa de Saaty

Código	Critério	Diagnóstico
Crit-1	Quantidade total de nascentes presentes no imóvel rural	Número de nascentes
Crit-2	Número total de moradores fixos e eventuais no imóvel rural	Número de moradores
Crit-3	Distância do imóvel rural em relação à Unidade de Conservação mais próxima	Distância linear até a UC mais próxima
Crit-4	Distância do imóvel rural em relação à aglomerados populacionais	Distância linear até a área urbana mais próxima
Crit-5	Localização do imóvel rural na microbacia hidrográfica	1 – Terço baixo; 2 – Terço médio; 3 – Terço alto
Crit-6	Tipologia da vegetação no entorno da(s) nascentes(s)	0 – Sem nascente; 1 – Floresta; 2 – Floresta e pastagem; 3 – Pastagem
Crit-7	Existência de gado (leiteiro ou de corte) no imóvel rural	0 – Não; 3 – Sim
Crit-8	Existência de nascente utilizada para abastecimento no imóvel rural	0 – Não; 3 – Sim
Crit-9	Existência de ações de recuperação de nascentes no imóvel rural	0 – Não; 3 – Sim
Crit-10	Origem da água captada para o consumo humano do imóvel rural	0 – Sem consumo; 1 – Outras fontes; 2 – Subterrânea; 3 – Superficial.
Crit-11	Existência de tratamento de esgoto doméstico no imóvel rural	0 – Sim; 3 – Não
Crit-12	Lançamento final do esgoto doméstico gerado no imóvel rural	0 – Sem geração; 1 – Lançamento no solo; 2 – Lançamento no solo e no corpo hídrico; 3 – Lançamento no corpo hídrico.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

3.2 Consulta técnica para definição dos percentuais de importância

Visando proporcionar uma isenção na atribuição dos percentuais de importância de cada critério, foi realizada uma consulta aos técnicos da Entidade Delegatária equiparada às funções de Agência de Bacia do CBH Doce e dos CBH afluentes mineiros. A área técnica da Entidade Delegatária é a responsável para operacionalização da Iniciativa RIO VIVO na bacia hidrográfica do rio Doce.

A consulta se deu por meio de formulário eletrônico do software Microsoft® Forms® (2020), sem a identificação dos participantes. Os formulários foram enviados à direção técnica da Entidade Delegatária que os encaminhou para os técnicos e as respostas foram

compiladas diretamente no software Microsoft® Forms® (2020), desta forma, garantindo o anonimato dos participantes.

As questões do formulário foram estruturadas de forma em que o participante julgava o grau de importância do critério em relação a outro (análise pareada), ou seja, o técnico avaliava se determinado critério era mais importante do que o outro critério em questão.

As respostas do julgamento de cada técnico, posteriormente, foram introduzidas na matriz da análise multicritério.

3.3 Análise Multicritério para determinação dos percentuais de importância por meio do método AHP

O Processo de Análise Hierárquico (AHP) consiste em uma metodologia direcionada para aperfeiçoar processos de tomada de decisão quando há multicritérios a serem avaliados, gerando um modelo validado que quantifica e hierarquiza a importância de cada critério a partir de pesos estipulados (MONTEIRO NETO *et al.*, 2021)

Matematicamente, de acordo com Zambon *et al.* (2005) , o método AHP consiste em gerar uma matriz quadrada ($n \times n$), na qual as linhas e as colunas correspondem aos critérios analisados para o problema em questão, com o α valor correspondente à importância relativa dos critérios da linha em comparação com os critérios da coluna .

O AHP emprega comparações entre critérios para a ponderação dos mesmos, medindo essas preferências através do uso de escalas (MATOS *et al.*, 2018). Na Tabela 2 está descrita a escala de importância relativa utilizada para a análise multicritério.

Tabela 2 – Importância relativa de Saaty

(Continua)

Intensidade da importância	Importância	Justificativa
1	Importância igual entre i e j	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada de i sobre j	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente um critério em relação a outro.
5	Importância grande de i sobre j	Experiência e julgamento favorecem fortemente um critério em detrimento de outro.

Intensidade da importância	Importância	Justificativa
7	Importância muito grande de i sobre j	A experiência e o julgamento mostram que um dos critérios é mais importante para o objetivo.
9	Importância extrema de i sobre j	Há evidências de que um critério é fortemente predominante sobre o outro.
2,4,6,8	Valores intermediários	Também podem ser usados, se necessário.

Fonte: Adaptado de Saaty (1986)

O julgamento reflete as respostas de duas perguntas: qual dos dois elementos é mais importante com respeito a um critério de nível superior, e com que intensidade, usando a escala de 1-9 (TABELA 2). É importante notar que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, como o inverso dessa unidade. Se o elemento linha é menos importante do que o elemento-coluna da matriz, entramos com o valor recíproco na posição correspondente da matriz.

Conforme Equação 1, após realizado os julgamentos, foi realizado o cálculo da média geométrica 1:

$$V_i = \prod_{i=1}^n a_{ij}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

Onde,

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \forall i, j = 1, 2, \dots, n$$

V_i = Média geométrica;

n = número de critérios;

a = valor da intensidade da importância;

i = linha;

j = coluna.

Os pesos foram calculados pela divisão da média geométrica pelo somatório da coluna média geométrica, conforme mostrado na equação a seguir (EQUAÇÃO 2):

$$W = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (2)$$

Onde,

W = Peso;

V_i = Média geométrica.

Nos cálculos finais é necessário analisar se os julgamentos foram coerentes. Para tal, Saaty (1986) criou a Razão de Consistência (RC), cujo objetivo é indicar a probabilidade de os valores calculados serem gerados aleatoriamente, efetuando a partir da divisão entre o Índice de Consistência (IC) e o Índice Randômico (IR) (índices criados pelo autor para determinar a coerência do julgamento) (eq. 3).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3)$$

O IC é calculado pelo máximo autovalor (λ_{max}) da matriz A. Os valores do IR são estimados a partir do número de variáveis (n) (SAATY, 1986) (TABELA 3).

Onde,

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{AxW}{W_i} \quad (3)$$

$$A \times W = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{21}} & \dots & 1 \dots \\ \frac{1}{a_{n1}} & \frac{1}{a_{n2}} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{c_1}{n} \\ \dots \\ \frac{c_n}{n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Tabela 3 – Índice randômico médio em função da ordem da matriz

Ordem (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Índice randômico	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

Fonte: Adaptado de Saaty (1986)

Conforme Addor e Santos (2017), a RC de uma matriz é dada por IC/IR. Uma razão de consistência até 10% é considerada aceitável, de acordo com SAATY (1986 *apud* ADDOR e SANTOS, 2017). Se a RC for superior a 10%, segundo a literatura, os julgamentos devem ser refeitos até que a consistência aumente.

Consequentemente, foram calculados os índices de consistência (IC) e as respectivas razões de consistência (RC) do resultado do julgamento e verificando a existência de consistência ou não no julgamento ($CR < 10\%$).

Os julgamentos dos técnicos para determinação do percentual de importância, bem como a consistência dos julgamentos, foram inseridos no programa AHP/OS versão 178 (GOPEL, 2018).

3.4 Classificação das alternativas: utilização do TOPSIS

Como um método clássico de tomada de decisão multi-atributo, a Técnica de Preferência de Pedido por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS), foi apresentada pela primeira vez por Hwang e Yoon em 1981 (HWANG; YOON, 1981).

A simplicidade dos procedimentos matemáticos do método TOPSIS contribui para a facilidade de implementação e aplicação (LIMA JÚNIOR; CARPINETTI, 2015). A natureza intuitiva do pensamento humano para encontrar o equilíbrio entre os tipos de indicadores de custo e benefício é imitada no TOPSIS (WONDIM; DZWAIRO, 2018). Portanto, para a classificação dos imóveis rurais foi escolhido o método TOPSIS. Com base no diagnóstico dos imóveis rurais e nos critérios de avaliação, a classificação dos imóveis seguiu da seguinte forma (ABDEL-BASSET e MOHAMED, 2020):

1. Como mostra a Equação 5, a normalização da matriz de decisão usando a fórmula de transformação linear do vetor TOPSIS.

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5)$$

Onde x_{ij} é a pontuação da alternativa i no critério j .

2. Usando a Equação 6, foi realizada a construção da matriz de decisão normalizada ponderada.

$$V = (v_{ij})_{m \times n} = w_{ij} \times r_{ij} \quad (6)$$

3. Identificação da solução ideal positiva (PIS) e a solução ideal negativa (NIS) usando as seguintes equações 7, 8, 9 e 10.

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (7)$$

$$v^+ = (\max_i v_{ij} | j \in J_b), (\min_i v_{ij} | j \in J_{nb}) | \in [1 \dots m] \quad (8)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (9)$$

$$v^- = (\min_i v_{ij} | j \in J_b), (\max_i v_{ij} | j \in J_{nb}) | \in [1 \dots m] \quad (10)$$

Onde J_b é um conjunto de critérios benéficos e J_{nb} é um conjunto de critérios não benéficos.

4. Utilização da fórmula da distância Euclidiana para calcular a distância de cada alternativa ao PIS e NIS para medir a separação do desempenho da alternativa i do PIS e NIS usando as Equações 11 e 12.

$$D_i^+ = \left[\sum_{j=1}^m (V_i - V_j^+)^2 \right]^{0.5} \quad (11)$$

$$D_i^- = \left[\sum_{j=1}^m (V_i - V_j^-)^2 \right]^{0.5} \quad (12)$$

5. Com base na Equação 13, foi obtido o coeficiente de proximidade de cada alternativa .

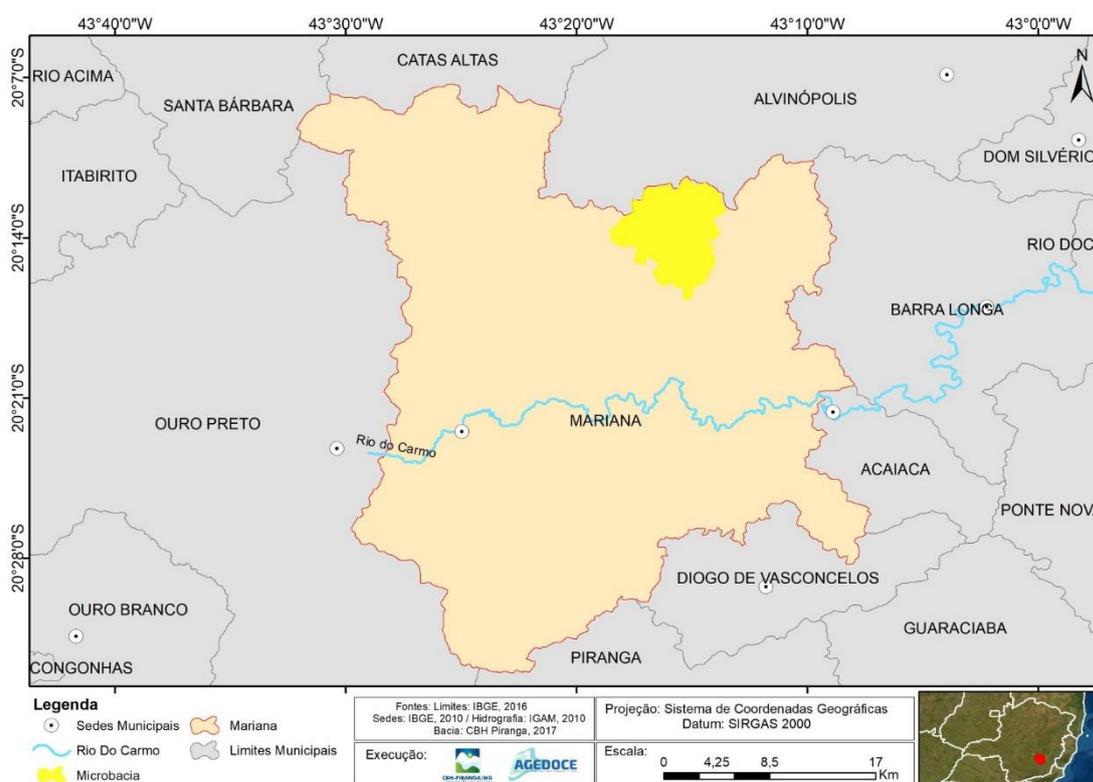
$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ - S_i^-} \quad (13)$$

A aplicação de todas as etapas do método TOPSIS foi modelada através do software Microsoft® Excel® para Microsoft 365 versão 2203 (2020).

3.5 Área do estudo de caso

A microbacia hidrográfica selecionada para o estudo de caso fica localizada no município de Mariana (MAPA 1). O município de Mariana está localizado na microrregião de Ouro Preto, Mesorregião da Metropolitana de Belo Horizonte e localiza-se na porção sudoeste da Bacia do Rio Doce. A sua área territorial é de 1194,208 km² e é banhado pelo Rio do Carmo, que possui dois afluentes: Gualaxo do Norte e Gualaxo do Sul.

Mapa 1 – Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

A microbacia possui uma área de 5.070,08 hectares e o exutório está localizado no ponto de captação de água para o consumo humano do distrito de Águas Claras, denominado Captação Buraco de Juá.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Percentuais de importância

Dos técnicos convidados a participar, um total de 6 profissionais participaram. Primeiramente, verificou-se a taxa de consistência (CR) obtida para cada técnico, em cada uma das matrizes de julgamento. As respostas que resultaram em CR maior que 10% foram eliminadas (SAATY, 1986).

Considerando somente as respostas válidas, obtiveram-se então os percentuais de importância relativa para a hierarquização dos imóveis rurais que receberão as intervenções da Iniciativa RIO VIVO. A Figura 1 apresenta os percentuais de importância, determinadas pelo método AHP.

Figura 1 – Percentuais de importâncias dos critérios de hierarquização

Hierarquia de Decisão		
Nível 0	Nível 1	Glb Prio.
RIO VIVO	Crit-1 0,206	20,6%
	Crit-2 0,103	10,3%
	Crit-3 0,096	9,6%
	Crit-4 0,093	9,3%
	Crit-5 0,170	17,0%
	Crit-6 0,060	6,0%
	Crit-7 0,066	6,6%
	Crit-8 0,082	8,2%
	Crit-9 0,032	3,2%
	Crit-10 0,036	3,6%
	Crit-11 0,028	2,8%
	Crit-12 0,027	2,7%
		1.0

Legenda: CR = 4,0%; grau de consenso do grupo = 80,9% (alto)

Glb Prio. = grau de prioridade (percentual de importância)

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

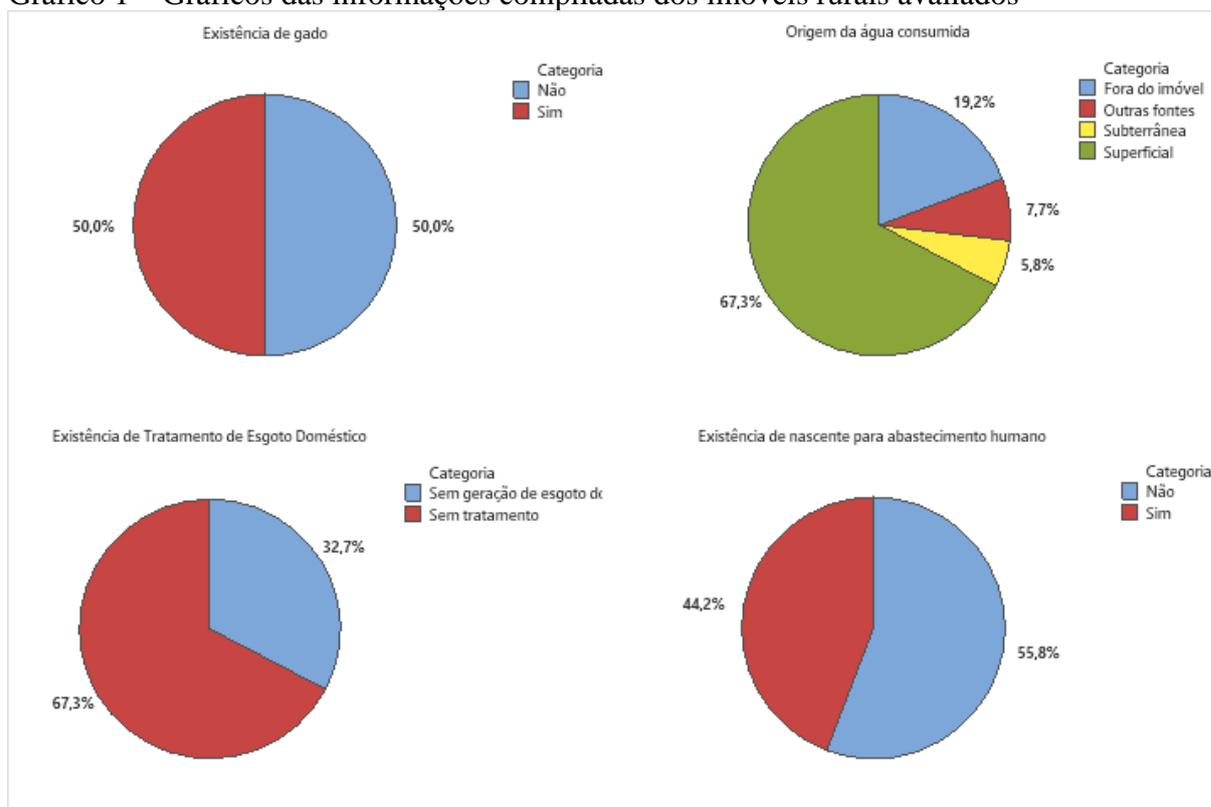
Dentro da faixa admissível recomendada por Saaty (1986), a taxa de consistência da matriz de julgamento (CR) foi de 4,0%. O grau de consenso do grupo foi de 80,9%, considerado “alto” pelo programa AHP-OS .

4.2 Características ambientais e econômicas dos imóveis rurais selecionados

Em relação à localização dos imóveis rurais na microbacia hidrográfica estudada, 38,5% ficam localizados no terço alto (cabeceira da microbacia), 30,8% localizam-se no terço médio e 30,8% localizam-se na parte baixa de microbacia (próximas ao ponto de captação de água para abastecimento coletivo).

O Gráfico 1 apresenta os percentuais dos critérios “Existência de gado”, “Origem da água consumida”, “Existência de tratamento do esgoto doméstico” e “Existência de nascente utilizada como manancial de água para abastecimento humano no imóvel rural”.

Gráfico 1 – Gráficos das informações compiladas dos imóveis rurais avaliados



Legenda: a) Percentuais dos critérios Existência de gado
 b) Origem da água consumida,
 c) Existência de tratamento do esgoto doméstico
 d) Existência de nascente para abastecimento humano no imóvel rural

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

A presença de atividades ligadas à pecuária de corte e/ou leiteira ocorreu em 50,0% dos imóveis rurais. Conforme Silva *et al.* (2019), a presença de gado nas áreas do entorno das nascentes gera impactos no solo, como a perda de matéria orgânica superficial, aumento da densidade do solo e redução da porosidade total.

A situação do saneamento básico é considerada precária, uma vez que não foram identificadas formas de tratamento da água para consumo humano e para o esgoto doméstico gerado nas residências. Em relação à origem da água consumida, 67,3% são captadas de mananciais superficiais, 19,9% são captadas por fontes fora do imóvel ou não há consumo de água, 7,7 % são captadas por outras fontes (caminhão-pipa ou cisternas de acumulação de águas de chuva) e 5,8% por mananciais subterrâneos. Do quantitativo de nascentes, 44,2% são utilizadas como fonte de abastecimento de água para consumo humano. Por fim, 67,3% dos imóveis rurais não têm tratamento do esgoto doméstico e 32,7% não há geração de esgoto sanitário.

4.2 Hierarquização dos imóveis rurais selecionados

A hierarquização foi realizada para os imóveis rurais habilitados a receberem as intervenções ligadas ao saneamento básico e à proteção de nascentes, propostas pela Iniciativa RIO VIVO (n=52).

São apresentadas, no Apêndice A e B, as matrizes de decisão, normalizada e ponderada. Por fim, chegou-se ao resultado do cálculo do coeficiente de proximidade (similaridade), o qual permite a observação da ordenação dos indicadores. O ranking da ordenação se dá de acordo com a ordem decrescente da solução ideal (BULGURCU, 2012). Está apresentado na Tabela 4 e no Mapa 2, o resultado da hierarquização dos imóveis, por meio da ferramenta TOPSIS.

Tabela 4 – Hierarquização dos imóveis rurais

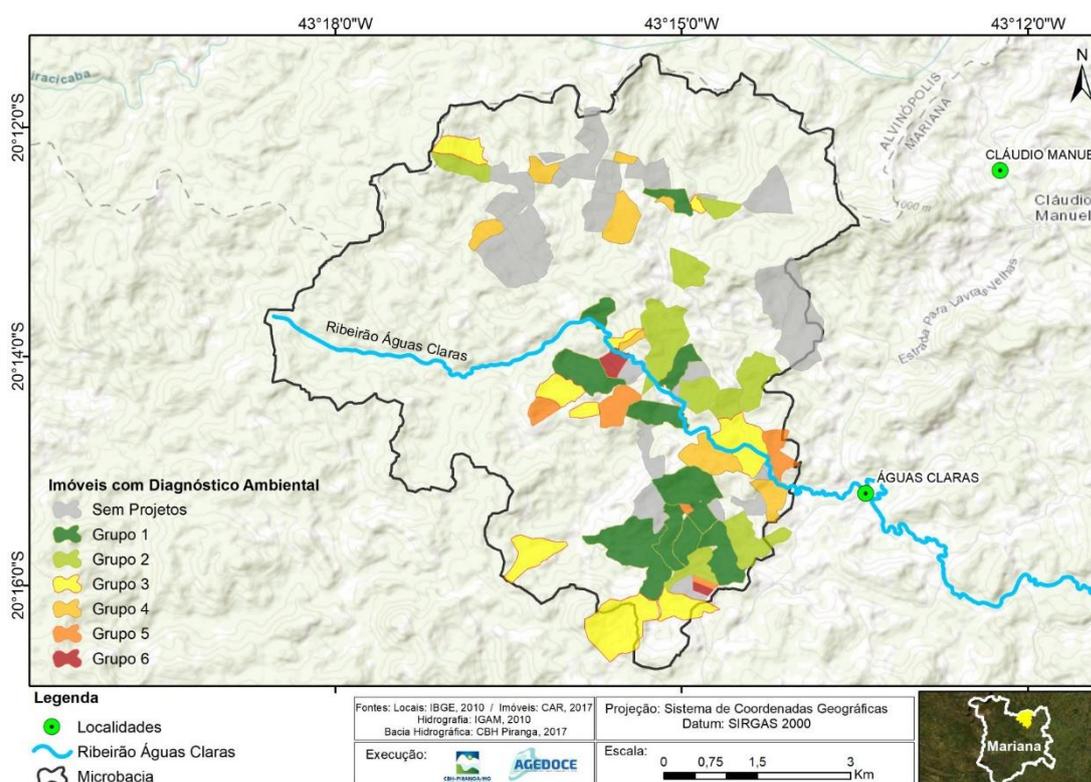
(Continua)

Código do imóvel	Similaridade	Ranking	Código do imóvel	Similaridade	Ranking
47	0,595752098	1	64	0,264288	27
43	0,516032509	2	62	0,261576	28
73	0,483959544	3	76	0,260879	29
22	0,472813522	4	84	0,258639	30
32	0,435365614	5	54	0,255024	31
60	0,432197317	6	19	0,252984	32
23	0,397292299	7	55	0,250101	33
50	0,377835468	8	82	0,248837	34
29	0,374780119	9	79	0,248832	35
4	0,361708236	10	18	0,244443	36
1	0,360782286	11	46	0,237246	37
42	0,352015616	12	31	0,226387	38
3	0,332328847	13	90	0,214623	39
78	0,330895906	14	44	0,211437	40
33	0,326426932	15	72	0,205835	41
10	0,320166135	16	52	0,205354	42
2	0,314927106	17	40	0,194446	43
7	0,290237438	18	91	0,193925	44
75	0,280389251	19	48	0,190607	45
9	0,276650552	20	51	0,187196	46
89	0,274888396	21	87	0,185491	47

Código do imóvel	Similaridade	Ranking	Código do imóvel	Similaridade	Ranking
8	0,274120842	22	61	0,183974	48
45	0,271741738	23	88	0,182365	49
57	0,271210973	24	15	0,180199	50
21	0,270317134	25	14	0,179079	51
68	0,269551228	26	36	0,171708	52

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Mapa 2 – Imóveis rurais hierarquizados



Nota: Grupo 1: do 1º ao 10º colocado na hierarquização; Grupo 2: do 11º ao 20º; Grupo 3: do 21º ao 30º; Grupo 4: do 31º ao 40º; Grupo 5: do 41º ao 50º e Grupo 6: 51º e 52º colocado na hierarquização.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Utilizando coeficiente de correlação de Spearman (1904), foi possível analisar a intensidade e a direção da relação linear entre os critérios. São apresentados na Tabela 5, os resultados da correlação.

Tabela 5 – Correlações de Spearman pareadas

(Continua)

Amostra 1	Amostra 2	N	Correlação	IC de 95% para ρ	Valor-p
Quantidade de nascentes	Ranking	5 2	-0,780	(-0,878; -0,621)	0,000
Número de moradores	Ranking	5 2	-0,398	(-0,612; -0,129)	0,004
Distância de núcleos populacionais	Ranking	5 2	-0,047	(-0,316; 0,229)	0,743
Localização na microbacia	Ranking	5 2	-0,065	(-0,333; 0,212)	0,645
Vegetação no entorno	Ranking	5 2	-0,244	(-0,487; 0,036)	0,082
Existência de gado	Ranking	5 2	-0,297	(-0,532; -0,020)	0,032
Existência de nascente para abastecimento	Ranking	5 2	-0,326	(-0,555; -0,051)	0,018
Origem da água	Ranking	5 2	-0,330	(-0,558; -0,055)	0,017
Tratamento de Esgoto	Ranking	5 2	-0,329	(-0,558; -0,054)	0,017
Lançamento final do esgoto	Ranking	5 2	-0,355	(-0,578; -0,082)	0,010
Número de moradores	Quantidade de nascentes	5 2	-0,118	(-0,380; 0,161)	0,403
Distância de núcleos populacionais	Quantidade de nascentes	5 2	0,033	(-0,243; 0,303)	0,819
Localização na microbacia	Quantidade de nascentes	5 2	-0,083	(-0,348; 0,195)	0,558
Vegetação no entorno	Quantidade de nascentes	5 2	0,375	(0,104; 0,594)	0,006
Existência de gado	Quantidade de nascentes	5 2	0,153	(-0,127; 0,410)	0,278
Existência de nascente para aba	Quantidade de nascentes	5 2	0,146	(-0,133; 0,404)	0,301
Origem da água	Quantidade de nascentes	5 2	-0,034	(-0,304; 0,241)	0,810
Tratamento de Esgoto	Quantidade de nascentes	5 2	-0,104	(-0,367; 0,175)	0,465
Lançamento final do esgoto	Quantidade de nascentes	5 2	-0,054	(-0,322; 0,222)	0,704
Distância de núcleos populacionais	Número de moradores	5 2	-0,076	(-0,342; 0,202)	0,594
Localização na microbacia	Número de moradores	5 2	0,037	(-0,238; 0,307)	0,793
Vegetação no entorno	Número de moradores	5 2	-0,058	(-0,326; 0,219)	0,683
Existência de gado	Número de moradores	5 2	0,077	(-0,200; 0,343)	0,586
Existência de nascente para aba	Número de moradores	5 2	0,112	(-0,167; 0,374)	0,431
Origem da água	Número de moradores	5 2	0,583	(0,349; 0,749)	0,000
Tratamento de Esgoto	Número de moradores	5 2	0,559	(0,319; 0,732)	0,000
Lançamento final do esgoto	Número de moradores	5 2	0,617	(0,392; 0,772)	0,000
Localização na microbacia	Distância de núcleos populacionais	5 2	0,838	(0,711; 0,912)	0,000
Vegetação no entorno	Distância de núcleos populacionais	5 2	-0,041	(-0,311; 0,234)	0,770

(Conclusão)

Amostra 1	Amostra 2	N	Correlação	IC de 95% para ρ	Valor- p
		2			
Existência de nascente para aba	Distância de núcleos populacionais	5 2	-0,041	(-0,311; 0,234)	0,771
Origem da água	Distância de núcleos populacionais	5 2	-0,076	(-0,342; 0,201)	0,591
Tratamento de Esgoto	Distância de núcleos populacionais	5 2	-0,052	(-0,320; 0,224)	0,715
Lançamento final do esgoto	Distância de núcleos populacionais	5 2	-0,059	(-0,326; 0,218)	0,680
Vegetação no entorno	Localização na microbacia	5 2	-0,164	(-0,419; 0,116)	0,246
Existência de gado	Localização na microbacia	5 2	-0,227	(-0,473; 0,053)	0,106
Existência de nascente para aba	Localização na microbacia	5 2	0,117	(-0,162; 0,378)	0,410
Origem da água	Localização na microbacia	5 2	0,141	(-0,139; 0,399)	0,320
Tratamento de Esgoto	Localização na microbacia	5 2	0,065	(-0,212; 0,332)	0,648
Lançamento final do esgoto	Localização na microbacia		0,004	(-0,269; 0,276)	0,978
Lançamento final do esgoto	Número de moradores	5 2	0,617	(0,392; 0,772)	0,000
Existência de gado	Vegetação no entorno	5 2	0,180	(-0,100; 0,433)	0,203
Existência de gado	Vegetação no entorno	5 2	0,180	(-0,100; 0,433)	0,203
Existência de nascente para aba	Vegetação no entorno	5 2	0,047	(-0,229; 0,316)	0,741
Origem da água	Vegetação no entorno	5 2	-0,218	(-0,466; 0,062)	0,120
Tratamento de Esgoto	Vegetação no entorno	5 2	-0,169	(-0,424; 0,110)	0,230
Lançamento final do esgoto	Vegetação no entorno	5 2	-0,126	(-0,387; 0,153)	0,373
Existência de nascente para aba	Existência de gado	5 2	-0,116	(-0,378; 0,163)	0,412
Origem da água	Existência de gado	5 2	-0,040	(-0,310; 0,235)	0,777
Tratamento de Esgoto	Existência de gado	5 2	-0,041	(-0,311; 0,235)	0,773
Lançamento final do esgoto	Existência de gado	5 2	0,070	(-0,207; 0,337)	0,623
Origem da água	Existência de nascente para abastecimento	5 2	0,490	(0,235; 0,682)	0,000
Tratamento de Esgoto	Existência de nascente para abastecimento	5 2	0,621	(0,397; 0,775)	0,000
Lançamento final do esgoto	Existência de nascente para abastecimento	5 2	0,432	(0,168; 0,639)	0,001
Tratamento de Esgoto	Origem da água	5 2	0,718	(0,530; 0,839)	0,000
Lançamento final do esgoto	Origem da água	5 2	0,578	(0,343; 0,745)	0,000
Lançamento final do esgoto	Tratamento de Esgoto	5 2	0,843	(0,719; 0,915)	0,000

Nota: Valor-p em itálico significa que a correlação é estatisticamente significativa a um nível de significância de 5%.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

O sinal de cada coeficiente indica a direção da relação. No caso da variável Ranking, quando analisado com as demais, a relação é sempre negativa. Logo, quando aumenta o valor de qualquer critério, aumenta a posição do imóvel rural na hierarquização.

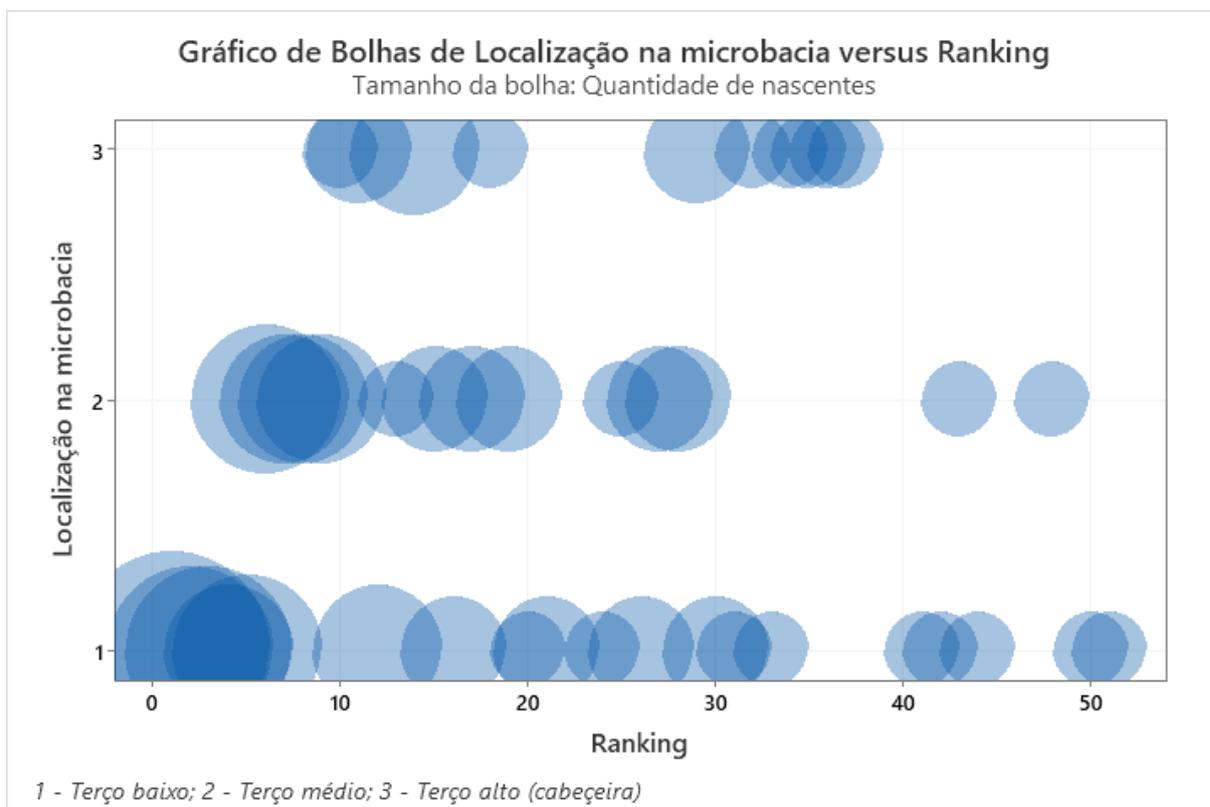
Os coeficientes de Spearman mostraram que, apenas os critérios “Número de moradores”, “Existência de nascentes para o abastecimento”, “Origem da água consumida”, “Tratamento de esgoto doméstico” e “Lançamento do Esgoto doméstico” apresentaram uma correlação positiva moderada entre si. Deve-se atar que, um coeficiente de correlação baixo não significa que não exista nenhuma relação entre os critérios, uma vez que podem ter uma relação não linear.

As correlações dos critérios “Distância do núcleo populacional”, “Localização na microbacia” e “Vegetação no entorno” com o “Ranking dos imóveis rurais” não são estatisticamente significativas, a um nível de significância de 5%.

Destaca-se a análise da correlação dos pares “Quantidade de nascentes” e “Ranking” é considerada moderada (-0,780), enquanto a correlação entre “Localização na microbacia” e “Ranking” foi fraca (-0,065). Isso resulta que, a posição do imóvel na hierarquização é fortemente impactada pela quantidade de nascentes dentro do imóvel e é estatisticamente significativa, enquanto a localização na microbacia é fracamente impactada e a correlação não é estatisticamente significativa a um nível de significância de 5%.

No Gráfico 2 é explorada a relação entre os critérios “Localização do imóvel rural na microbacia” e “Quantidade de nascentes no imóvel rural com o Ranking”. O gráfico de bolha representa graficamente a Localização do imóvel (y) versus o Ranking (x). A área de cada bolha representa o valor da Quantidade de nascentes no imóvel rural.

Gráfico 2 – Bolhas da localização na microbacia *versus* ranking *versus* quantidade de nascentes



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

O gráfico mostra que os imóveis rurais localizados na parte baixa da microbacia configuram nas primeiras posições da hierarquização. Os imóveis localizados nos terços alto e médio ficaram nas colocações intermediárias da hierarquização. Também é possível observar que, os imóveis localizados no terço baixo (próximos a captação de água) possuem uma quantidade maior de nascentes por imóvel rurais, conforme evidenciado pelos tamanhos das bolas na parte superior do gráfico.

A proximidade dos imóveis rurais com o centro urbano e a quantidade de nascentes dentro no imóvel e a quantidade de moradores possui um impacto significativo na hierarquização. Uma menor distância entre o imóvel rural e o centro urbano mais próximo facilita o deslocamento das equipes executoras das intervenções e de mobilização social, já uma maior quantidade de nascentes dentro do mesmo imóvel, aumenta o rendimento na execução das obras. Um maior número de pessoas residentes por imóvel impacta principalmente nas questões ligadas ao saneamento rural, uma vez que atendendo um maior número de pessoas por imóvel, o impacto na redução do descarte inadequado no esgoto doméstico é maior.

5 CONCLUSÃO

O modelo desenvolvido no presente estudo resultou em uma ferramenta de hierarquização de imóveis rurais contemplados ou habilitados para o recebimento de programas hidroambientais. A utilização do método multicritério AHP foi importante para atribuição dos percentuais de importância dos critérios de seleção, o que permite tomada de d

ecisões baseadas em critérios estritamente técnicos e com ausência de subjetividade.

A hierarquização dos imóveis rurais foi otimizada com a utilização do TOPSIS, que avaliou as características dos imóveis através da similaridade deles com um imóvel ideal a ser prioritário no recebimento das intervenções hidroambientais.

A quantidade de nascentes presentes no imóvel rural, as características ligadas ao saneamento básico, presença de gado e o número de moradores no imóvel foram mais relevantes na hierarquização, enquanto a distância do imóvel em relação a um núcleo urbano, localização na microbacia e presença de vegetação no entorno das nascentes não influenciaram na classificação dos imóveis, do ponto de vista estatístico. Os critérios, que foram proeminentes na classificação dos imóveis rurais, podem ser utilizados como norteadores de futuros estudos e ações visando identificar áreas rurais mais aptas a receberem programas hidroambientais e contribuir com a conservação dos recursos hídricos.

O modelo proposto constitui em uma ferramenta para tomada de decisão dos gestores da área de recursos hídricos e implementação de políticas públicas, a qual pode ser aplicada em outras microbacias hidrográficas, com objetivos de estabelecer uma ordem de prioridade de desembolso de recursos financeiros.

REFERÊNCIAS

ABDEL-BASSET, M; MOHAMED, R. A novel plithogenic TOPSIS- CRITIC model for sustainable supply chain risk management. **Journal of cleaner production**, Knoxville, v. 247, n. 20, fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119586>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619344567>. Acesso em: 18 out. 2021.

ADDOR, M. R. A.; SANTOS, E. T. Salas de coordenação de projetos em BIM: proposta de um método de avaliação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 403-423, out./dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400204>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/Qj5mSpwnK4CcSBm3BrfkSXk/?lang=pt>. Acesso em: : 05 out. 2021.

ALMEIDA, F. C. de *et al.* Análise multicritério na definição de áreas prioritárias para recuperação florestal na Bacia do Rio Doce, em Minas Gerais. **Nativa, Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Mato Grosso, v. 8, n. 1, p. 81-90, jan./fev. 2020. DOI:

<http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8130>. Disponível em:

<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/8130>. Acesso em: 18 out. 2021.

BARCELOS, A. A; CABRAL, J. B. P. Caracterizações físicas e químicas das águas dos afluentes da UHE Caçu. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 3, n. 6. p. 739-749, jun. 2012. Ed. esp. Disponível em: <https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1983>. Acesso em: 25 out. 2021.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 19 out. 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 8 jan. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm. Acesso em: 19 out. 2021.

BORGES, F. R. F. .; EZEZINOS, K. E. .; VIEIRA, E. M. . The rainfall erosivity on rio Doce basin cities of Minas Gerais, through the netErosividade MG software. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 11, p. 1-39, 2020. DOI:

<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10126>. Disponível em:

<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/10126/9099>. Acesso em: 03 out. 2021.

BULGURCU, B. Application of TOPSIS technique for financial performance evaluation of technology firms in Istanbul stock exchange market. **Procedia: Social and Behavioral Sciences**, Amsterdam, v. 62, n. 1, p. 1033-1040, 2012. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.176>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812036178>. Acesso em: 05 out. 2021.

CAMPOS, V. R. ; CAZARINI, E.W. ; CAMPOS, J. N. B. Gerenciamento de portfólio de projetos de saneamento nos Comitês das Bacias PCJ: método multicritério para hierarquização. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 457- 465, maio./jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020190376>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/esa/a/KkNDXWjycmK7JfBbNKYGdrk/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 18 out. 2021.

CATELANI, C. de S. *et al.* Determinação de áreas prioritárias para o restabelecimento da cobertura florestal, apoiada no uso de geotecnologias. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 113-126, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.964>. Disponível em: <http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/964>. Acesso em: 03 out. 2021.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH DOCE). **Deliberação ad referendum nº 48 de 01 de dezembro de 2015**. Institui o Plano de Aplicação Plurianual da Bacia Hidrográfica do Rio Doce para o período de 2016 a 2020. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/09/Delibera%C3%A7%C3%A3o-48-Institui-o-Plano-de-Aplica%C3%A7%C3%A3o-Plurianual-2016-2020.pdf>. Acesso em: 21 out. 2021.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH DOCE). **Deliberação normativa nº 90 de dezembro 2020 de 2020**. Institui o Plano de Aplicação Plurianual da Bacia Hidrográfica do Rio Doce para o período de 2021 a 2025. Disponível em: http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2021/01/PAP-Consolidado-DN_ANEXO-1.pdf. Acesso em: 21 out. 2021.

CONSOMINAS ENGENHARIA. **Diagnósticos ambientais compilados: P4.2 CBH01. L01. M118 V00: Mariana**. 2019. Disponível em: <https://www.cbhpiranga.org.br/mariana-2>. Acesso em: 28 abr. 2022.

CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce**. Governador Valadares, 2010. Disponível em: . Acesso em: 18 out. 2021.

GOEPEL, K. D. Implementation of an online software tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, Pittsburgh, v. 10, n. 3, p. 469-487, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>. Disponível em: <https://ijahp.org/index.php/IJAHp/article/view/590>. Acesso em: 10 out. 2021.

HATJE, V. *et al.* The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, London, v.7, n.10706, p. 1-13, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-11143-x.pdf>. Acesso em: 05 out. 2021.

HWANG, C.L.; YOON K.P. **Multiple attribute decision making: methods and applications**. New York: Springer-Verlag, 1981.

JANKOWSKY, M. *et al.* Peixes e pesca na bacia do Rio Doce, uma análise bibliométrica. **Brazilian Journal of Production Engineering**, São Mateus (ES), v. 6, n. 8, p. 14-40, 2021. Ed. esp. DOI: <https://doi.org/10.47456/bjpe.v6i8.33769>. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/33769>. Acesso em: 10 out. 2021.

LIMA JÚNIOR, F. R.; CARPINETTI, L. C. R. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores.

Gestão & Produção, São Carlos, v. 22, n. 1, p. 17-34, mar. 2015. DOI:

<https://doi.org/10.1590/0104-530X1190>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/gp/a/YYQS49M7kYZGVG8sgcKxJHC/?lang=pt>. Acesso em: 12. out. 2021.

MATOS, P. V. *et al.* The use of multi-criteria analysis in the recovery of abandoned mines: a study of intervention in Portugal. **RAUSP Management Journal**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 214-224, abr./jun., 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rauspm.2017.06.005>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0080210716307749>. Acesso em: 05 out. 2021.

MIRANDA, C. C. *et al.* Analysis of the collection for the use of water resources in Union-dominated waters: case study of the Doce river watershed (MG). **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 4, p.1-18, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.13785>. Disponível em:

<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13785>. Acesso em: 10 out. 2021.

MONTEIRO NETO, A. M. *et al.* Análise multicritérios como ferramenta de identificação de áreas aptas à expansão da dendeicultura na Bacia Hidrográfica do Rio Acará, PA. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 12, n. 8, p. 585-607, ago. 2021. DOI:

<https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0046>. Disponível em:

<https://sustenere.co/index.php/rica/article/view/6092>. Acesso em: 10 out. 2021.

PIMENTA, L. B. *et al.* Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações**, Campo Grande, v. 20, n. 2, p. 407-420, abr./jun. 2019. DOI:

<https://doi.org/10.20435/inter.v20i2.1856>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/inter/a/czmJyn93szNcX5jfXjpPR8M/?lang=pt>. Acesso em: 10 out. 2021.

RICHARD, E. d. C. *et al.* Water and Sediment Quality in the Coastal Zone Around the Mouth of Doce River After the Fundão Tailings Dam Failure. **Integr Environ Assess Manag**, San Francisco, v. 16, n. 5, p. 643-654, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1002/ieam.4309>. Disponível em:

<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ieam.4309>. Acesso em: 20 de out. de 2021.

SAATY, T.L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw Hill, 1986 *apud*

ADDOR, M. R. A.; SANTOS, E. T. Salas de coordenação de projetos em BIM: proposta de um método de avaliação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 403-423,

out./dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400204>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ac/a/Qj5mSpwnK4CcSBm3BrfkSXk/?lang=pt>. Acesso em: : 05 out. 2021.

SAITO, C. *et al.* Nutritional values and antioxidative activities of whole peanuts and peanut skins for ruminant feeds. **Animal Science. Journal**, Sendai, v. 87, n. 1, p. 54-60, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/asj.12405>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/asj.12405>. Acesso em: 17 out. 2021.

SANTOS, L. A. dos *et al.* Áreas prioritárias para regularização fundiária no estado da Bahia (Brasil). **Finisterra, Revista Portuguesa de Geografia**, Lisboa, v. 53, n. 107, p. 27- 50, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18055/Finis10618>. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/finisterra/article/view/10618>. Acesso em: 10 out. 2021.

SILVA, A. S. da. *et al.* Influência do pisoteio do gado na alteração das propriedades físicas de horizontes superficiais em Santo Antônio de Pádua. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 35, jul./dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.46650>. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/46650>. Acesso em: 13 out. 2021.

SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. **The American Journal of Psychology**, New York, v.15, n.1, p.72–101, 1904. DOI: <https://doi.org/10.2307/1412159>. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1412159?seq=1>. Acesso em: 18 out. 2021.

VILARINHO, C. M. R. *et al.* Eficácia da cobrança pelo uso de recursos hídricos condicionada ao Índice de Qualidade da Água: estudo de Caso, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 14, n.01, p. 266-280, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.1.p266-280>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/248872>. Acesso em: 14 out. 2021.

WONDIM, T. T.; DZWAIRO, B. “A scenario-based multiple attribute decision-making approach for site selection of a wastewater treatment plant: Bahir Dar City (Ethiopia) case study. **Water SA**, Pretória, v. 44, n.4, p. 782-794, out. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i4.26>. Disponível em: <https://watersa.net/article/view/6685>. Acesso em: 19 out. de 2021.

ZAMBON, K. L. *et al.* Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 183-199, maio/ago. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382005000200002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pope/a/MtFMpzKrZBYm6CVPg4k3PwP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 18 out. 2021.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP Filial Governador Valadares, ao CBH Doce e aos Comitês de Bacia Hidrográfica dos afluentes do rio Doce.

APÊNDICE A – MATRIZ DE DECISÃO

Pesos	19%	11%	9%	9%	18%	6%	7%	8%	4%	4%	3%	2%
Tipo	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
Imóvel	Quantidade de nascentes	Número de moradores	Distância de UC	Distância de núcleos populacionais	Localização na microbacia	Vegetação no entorno	Existência de gado	Existência de nascente para abastecimento	Existência de ações de recuperação de nascentes	Origem da água	Tratamento de Esgoto	Lançamento final do esgoto
1	2	7	1	4497	3	3	3	3	3	3	3	1
2	2	2	1	2564	2	3	3	3	3	3	3	1
3	1	14	1	2450	2	1	3	3	3	3	3	3
4	1	15	1	5566	3	3	3	3	3	3	3	3
7	1	8	1	5117	3	1	0	3	3	3	3	3
8	0	12	1	5219	3	0	3	0	3	3	3	1
9	1	11	1	2895	1	3	3	0	3	3	3	3
10	2	12	1	2759	1	3	0	0	3	3	3	1
14	1	0	1	2914	1	3	0	0	3	0	0	0
15	1	0	1	2825	1	3	0	0	3	0	0	0
18	1	5	1	6521	3	3	0	0	3	3	0	0
19	1	2	1	5756	3	1	0	3	3	3	3	0
21	1	12	1	4458	2	3	0	0	3	2	3	1
22	3	24	1	3008	1	3	0	0	3	3	3	3
23	3	6	1	3453	2	3	3	3	3	3	3	1
29	3	6	1	3380	2	1	0	3	3	3	3	1
31	0	9	1	1456	1	0	3	0	3	3	3	1
32	4	8	1	2393	1	1	3	0	3	3	0	0
33	2	9	1	2971	2	1	0	3	3	3	3	1
36	0	6	1	4354	2	0	0	0	3	3	3	3
40	1	5	1	3991	2	1	0	0	3	3	0	0
42	3	4	1	1839	1	3	3	0	3	3	0	0
43	5	6	1	2671	1	1	3	3	3	3	3	3
44	0	8	1	4305	2	0	3	0	3	3	3	3
45	0	15	1	4459	2	0	3	0	3	3	3	1
46	1	4	1	5583	3	1	0	0	3	3	3	3
47	7	5	1	3671	1	1	3	0	3	1	3	3
48	0	2	1	4651	3	0	0	0	3	1	0	0
50	3	8	1	5379	2	0	0	3	3	3	3	3
51	0	2	1	1362	1	0	3	0	3	3	3	1
52	1	1	1	1603	1	1	3	0	3	1	0	0
54	1	3	1	2492	1	3	3	3	3	3	3	3
55	1	6	1	2449	1	3	0	3	3	3	3	1
57	1	6	1	2060	1	3	3	3	3	2	3	3

Pesos	19%	11%	9%	9%	18%	6%	7%	8%	4%	4%	3%	2%
Tipo	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
Imóvel	Quantidade de nascentes	Número de moradores	Distância de UC	Distância de núcleos populacionais	Localização na microbacia	Vegetação no entorno	Existência de gado	Existência de nascente para abastecimento	Existência de ações de recuperação de nascentes	Origem da água	Tratamento de Esgoto	Lançamento final do esgoto
60	4	0	1	4640	2	3	3	3	3	3	3	1
61	1	0	1	5051	2	1	3	0	3	0	0	0
62	2	0	1	4904	2	3	3	0	3	0	0	0
64	2	1	1	4904	2	3	3	0	3	0	0	0
68	2	5	1	4268	1	3	3	0	3	1	0	0
72	1	1	1	2806	1	3	3	0	3	0	0	0
73	5	1	1	2825	1	1	3	3	3	3	3	1
75	2	1	1	3899	2	2	0	3	3	3	3	1
76	2	0	1	8291	3	1	0	0	3	0	0	0
78	3	0	1	8122	3	1	0	0	3	0	0	0
79	1	2	1	7105	3	1	0	3	3	3	3	1
82	1	2	1	7103	3	1	0	3	3	3	3	1
84	2	1	1	3283	1	3	3	0	3	0	0	0
87	0	3	1	2773	1	0	0	3	3	3	3	1
88	0	2	1	2725	1	0	0	3	3	3	3	1
89	2	3	1	2761	1	1	0	3	3	3	3	1
90	0	6	1	2858	1	3	0	3	3	2	3	1
91	1	0	1	481	1	0	0	0	3	0	0	0

APÊNDICE B – MATRIZ NORMALIZADA E PONDERADA

Imóvel	Quantidade de nascentes	Número de moradores	Distância de UC	Distância de núcleos populacionais	Localização na microbacia	Vegetação no entorno	Existência de gado	Existência de nascente para abastecimento	Existência de ações de recuperação de nascentes	Origem da água	Tratamento de Esgoto	Lançamento final do esgoto
1	0,023828032	0,01471942	0,013035455	0,013223	0,038571	0,012136	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
2	0,023828032	0,004205549	0,013035455	0,007539	0,025714	0,012136	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
3	0,011914016	0,02943884	0,013035455	0,007204	0,025714	0,004045	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
4	0,011914016	0,031541615	0,013035455	0,016366	0,038571	0,012136	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
7	0,011914016	0,016822195	0,013035455	0,015046	0,038571	0,004045	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
8	0	0,025233292	0,013035455	0,015346	0,038571	0	0,013532	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
9	0,011914016	0,023130518	0,013035455	0,008513	0,012857	0,012136	0,013532	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
10	0,023828032	0,025233292	0,013035455	0,008113	0,012857	0,012136	0	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
14	0,011914016	0	0,013035455	0,008568	0,012857	0,012136	0	0	0,005131	0	0	0
15	0,011914016	0	0,013035455	0,008307	0,012857	0,012136	0	0	0,005131	0	0	0
18	0,011914016	0,010513872	0,013035455	0,019174	0,038571	0,012136	0	0	0,005131	0,005936	0	0

Im.	Quantidade de nascentes	Número de moradores	Distância de UC	Distância de núcleos populacionais	Localização na microbacia	Vegetação no entorno	Existência de gado	Existência de nascente para abastecimento	Existência de ações de recuperação de nascentes	Origem da água	Tratamento de Esgoto	Lançamento final do esgoto
19	0,011914016	0,004205549	0,013035455	0,016925	0,038571	0,004045	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0
21	0,011914016	0,025233292	0,013035455	0,013108	0,025714	0,012136	0	0	0,005131	0,003957	0,005578	0,002043
22	0,035742048	0,050466584	0,013035455	0,008845	0,012857	0,012136	0	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
23	0,035742048	0,012616646	0,013035455	0,010153	0,025714	0,012136	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
29	0,035742048	0,012616646	0,013035455	0,009939	0,025714	0,004045	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
31	0	0,018924969	0,013035455	0,004281	0,012857	0	0,013532	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
32	0,047656064	0,016822195	0,013035455	0,007036	0,012857	0,004045	0,013532	0	0,005131	0,005936	0	0
33	0,023828032	0,018924969	0,013035455	0,008736	0,025714	0,004045	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
36	0	0,012616646	0,013035455	0,012803	0,025714	0	0	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
40	0,011914016	0,010513872	0,013035455	0,011735	0,025714	0,004045	0	0	0,005131	0,005936	0	0
42	0,035742048	0,008411097	0,013035455	0,005407	0,012857	0,012136	0,013532	0	0,005131	0,005936	0	0
43	0,05957008	0,012616646	0,013035455	0,007854	0,012857	0,004045	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
44	0	0,016822195	0,013035455	0,012659	0,025714	0	0,013532	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
45	0	0,031541615	0,013035455	0,013111	0,025714	0	0,013532	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
46	0,011914016	0,008411097	0,013035455	0,016416	0,038571	0,004045	0	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
47	0,083398111	0,010513872	0,013035455	0,010794	0,012857	0,004045	0,013532	0	0,005131	0,001979	0,005578	0,006129
48	0	0,004205549	0,013035455	0,013676	0,038571	0	0	0	0,005131	0,001979	0	0
50	0,035742048	0,016822195	0,013035455	0,015817	0,025714	0	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
51	0	0,004205549	0,013035455	0,004005	0,012857	0	0,013532	0	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
52	0,011914016	0,002102774	0,013035455	0,004713	0,012857	0,004045	0,013532	0	0,005131	0,001979	0	0
54	0,011914016	0,006308323	0,013035455	0,007328	0,012857	0,012136	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,006129
55	0,011914016	0,012616646	0,013035455	0,007201	0,012857	0,012136	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
57	0,011914016	0,012616646	0,013035455	0,006057	0,012857	0,012136	0,013532	0,016681	0,005131	0,003957	0,005578	0,006129
60	0,047656064	0	0,013035455	0,013644	0,025714	0,012136	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
61	0,011914016	0	0,013035455	0,014852	0,025714	0,004045	0,013532	0	0,005131	0	0	0
62	0,023828032	0	0,013035455	0,01442	0,025714	0,012136	0,013532	0	0,005131	0	0	0
64	0,023828032	0,002102774	0,013035455	0,01442	0,025714	0,012136	0,013532	0	0,005131	0	0	0
68	0,023828032	0,010513872	0,013035455	0,01255	0,012857	0,012136	0,013532	0	0,005131	0,001979	0	0
72	0,011914016	0,002102774	0,013035455	0,008251	0,012857	0,012136	0,013532	0	0,005131	0	0	0
73	0,05957008	0,002102774	0,013035455	0,008307	0,012857	0,004045	0,013532	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
75	0,023828032	0,002102774	0,013035455	0,011465	0,025714	0,00809	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
76	0,023828032	0	0,013035455	0,024379	0,038571	0,004045	0	0	0,005131	0	0	0
78	0,035742048	0	0,013035455	0,023882	0,038571	0,004045	0	0	0,005131	0	0	0
79	0,011914016	0,004205549	0,013035455	0,020892	0,038571	0,004045	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
82	0,011914016	0,004205549	0,013035455	0,020886	0,038571	0,004045	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
84	0,023828032	0,002102774	0,013035455	0,009653	0,012857	0,012136	0,013532	0	0,005131	0	0	0
87	0	0,006308323	0,013035455	0,008154	0,012857	0	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
88	0	0,004205549	0,013035455	0,008013	0,012857	0	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043

Im.	Quantidade de nascentes	Número de moradores	Distância de UC	Distância de núcleos populacionais	Localização na microbacia	Vegetação no entorno	Existência de gado	Existência de nascente para abastecimento	Existência de ações de recuperação de nascentes	Origem da água	Tratamento de Esgoto	Lançamento final do esgoto
89	0,023828032	0,006308323	0,013035455	0,008118	0,012857	0,004045	0	0,016681	0,005131	0,005936	0,005578	0,002043
90	0	0,012616646	0,013035455	0,008404	0,012857	0,012136	0	0,016681	0,005131	0,003957	0,005578	0,002043
91	0,011914016	0	0,013035455	0,001414	0,012857	0	0	0	0,005131	0	0	0