



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



JANUÁRIO CHIRIELEISON FERNANDES

**USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E AHP NA
REDUÇÃO DA SUBJETIVIDADE NA SELEÇÃO DE
ÁREAS COM POTENCIAL PARA COLETA DE ÁGUA DA
CHUVA**

Uberlândia, 2020

JANUÁRIO CHIRIELEISON FERNANDES

**USO DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS E AHP NA
REDUÇÃO DA SUBJETIVIDADE NA SELEÇÃO DE
ÁREAS COM POTENCIAL PARA COLETA DE ÁGUA DA
CHUVA**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos
Hídricos e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto
Reolon Schmidt

Uberlândia, 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F363u
2020 Fernandes, Januário Chirieleison, 1979
 Uso de redes neurais artificiais e AHP na redução da subjetividade
 na seleção de áreas com potencial para coleta de água da chuva [recurso
 eletrônico] / Januário Chirieleison Fernandes. - 2020.

 Orientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.F363u>
 Inclui bibliografia.
 Inclui ilustrações.

 1. Engenharia civil. I. Schmidt, Marcio Augusto Reolon, 1978,
(Orient.) II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 236, PPGE				
Data:	02 de abril de 2019	Hora de início:	14h00	Hora de encerramento:	15h48
Matrícula do Discente:	11712ECV003				
Nome do Discente:	Januário Chirieleison Fernandes				
Título do Trabalho:	Uso de redes neurais artificiais e AHP na redução da subjetividade na seleção de áreas com potencial para coleta de água da chuva				
Área de concentração:	Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Engenharia Urbana				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Análise Espacial Ambiental				

Reuniu-se na Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta: Professores Doutores: Rodrigo Mikosz Gonçalves – CTG/UFPE, Claudionor Ribeiro da Silva – IG/UFU e Marcio Augusto Reolon Schmidt - FECIV/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Mikosz Gonçalves, Usuário Externo**, em 02/04/2019, às 18:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Augusto Reolon Schmidt, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/04/2019, às 09:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudionor Ribeiro da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/04/2019, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1069518** e o código CRC **1882EAA4**.

Dedico este trabalho a meus pais Bete e Milton.

Minha esposa Lilia.

Meus filhos Luiz e Rafa.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Professor Marcio Augusto Reolon Schmidt, meus pais Elisabete Chirieleison Fernandes e Milton Vicente Fernandes, minha esposa, Lilia Caetano da Silva e minha tia, Sueli Chirieleison Dias, pelo apoio, paciência e por nunca desistirem de mim.

Agradeço aos membros das minhas bancas de qualificação e defesa, Professores Claudionor Ribeiro da Silva, Marcio Ricardo Salla e Rodrigo Mikosz Gonçalves pelas preciosas colocações e sugestões.

Agradeço ao coordenador do curso de Engenharia Cartográfica, Professor Fernando Luiz de Paula Santil e ao coordenador do laboratório de Topografia e Geodésia, Professor Gabriel do Nascimento Guimarães pelo apoio e compreensão.

Agradeço ao Professor George Deroco Martins e ao colega Valdiney José da Silva pelas ideias e contribuições.

Agradeço ao colega Weldon pelo companheirismo e parceria nas viagens para Uberlândia, nos estudos e nos desabafos nas horas difíceis.

RESUMO

Os eventos extremos relacionados às chuvas, cheias e estiagem, apesar de naturais podem tem efeitos indesejados tanto no meio urbano quanto rural. Portanto, as técnicas de captação de água da chuva, conhecidas como *Rainwater Harvesting* (RWH), são vistas como uma alternativa com boa relação de custo benefício para controlar o escoamento superficial. No entanto, para que a sua maior eficiência seja alcançada é necessário que se faça uma avaliação criteriosa da bacia em questão, para identificação das áreas com maior potencial para implantação dessas estruturas. Como essa análise depende de vários fatores, como declividade, uso e cobertura do solo, densidade da rede de drenagem, características hidrológicas do solo e precipitação, a análise de decisão multicritério com suporte a Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) tem grande potencial para este fim. Dentro dessa metodologia a Análise Hierárquica de Processo (*Analytic Hierarchy Process* - AHP), é uma técnica bastante utilizada para a ponderação dos critérios. No entanto, esta técnica vem sendo questionada devido à sua incapacidade de detectar e minimizar as interferências causadas pela subjetividade dos especialistas na ponderação dos critérios. Com isto em vista, o presente trabalho propõe a utilização de Redes Neurais Artificiais como forma de minimizar esta subjetividade na ponderação de critérios para a seleção de áreas com potencial para RWH. Para isso, essas técnicas foram aplicadas à Bacia do Rio Uberabinha, localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, no estado de Minas Gerais, Brasil. Foi possível observar que apenas o Coeficiente de Consistência (CR) não se mostrou suficiente para a validação da subjetividade da AHP. Observou-se ainda que as redes neurais se mostraram eficientes para combinar os pesos atribuídos pelos especialistas e que o número e a configuração das camadas ocultas não interferiram na combinação dos pesos. No tocante às funções de ativação, observou-se que a logística produziu resultados diferente das outras funções. Por fim, observou-se que o fator que mais interferiu no resultado produzido pelas redes foi a média utilizada como alvo para o treinamento.

Palavras-chave: Coleta de água da chuva - Análise de Decisão multicritério – Sistema de Informação Geográfica - Análise Hierárquica de Processo - Rede Neural Artificial

ABSTRACT

Extreme events related to rainfall, as floods and drought, although natural, can have undesirable effects in both urban and rural environments. Therefore, rainwater harvesting techniques, known as Rainwater Harvesting (RWH), are seen as a cost-effective alternative to controlling runoff. However, in order to achieve greater efficiency, it is necessary to make a careful evaluation of the watershed in question to identify the areas with the greatest potential for implementation of these structures. As this analysis depends on several factors, such as slope, land use and coverage, drainage network density, soil hydrologic characteristics and precipitation, multicriteria decision analysis with support to Geographic Information Systems (GIS) has great potential for this end. Within this methodology Hierarchical Process Analysis (AHP), is a technique widely used to weigh the criteria. Nonetheless, this technique has been questioned due to its inability to detect and minimize the interference caused by the subjectivity of the specialists in the weighting of the criteria. However, the present work proposes the use of Artificial Neural Networks (ANNs) as a way of minimizing this subjectivity in the weighting of criteria for the selection of areas with potential for RWH. For this, these techniques are applied to the Uberabinha River Watershed, located in the mesoregion of the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba, in the state of Minas Gerais, Brazil. It was possible to see that the Consistency Ratio (CR) was not enough to evaluate the AHP subjectivity. It was also noted that the neural nets revealed to be effective to combine the weight assigned by the specialists and the hidden layers numbers and settings didn't interfere in the weight combination. Regarding the activation function, it was noted that the logistic function generated distinct output than the other function. At least, it was noted that the average employed as training target was the main factor to interfere in the nets results.

Keywords: Rainwater Harvesting - Multicriteria Decision Analysis - Geographic Information System - Analytic Hierarchy Process - Artificial Neural Network

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de um neurônio de mamífero.	16
Figura 2 - Estrutura do neurônio artificial e da rede neural artificial.	17
Figura 3 - Funcionamento do algoritmo <i>Back-propagation</i>	18
Figura 4 - Classificação de acordo com o algoritmo de aprendizagem.....	19
Figura 5 - Modelo não-linear de um neurônio.....	20
Figura 6 - Localização da área de estudo.	23
Figura 7 - Fluxograma de atividades.	26
Figura 8 - Figura do mapa de declividade.	39
Figura 9 - Figura do mapa de densidade de drenagem.	40
Figura 10 - Figura do mapa de cobertura e uso do solo.	42
Figura 11 - Figura do mapa de classes dos solos.....	44
Figura 12 - Figura do mapa de HSG.	45
Figura 13 - Figura do mapa de CN.	46
Figura 14 - Figura do mapa de área de influência das estações meteorológicas.	48
Figura 15 - Figura do mapa de coeficiente de escoamento.	49
Figura 16 - Agrupamento hierárquico das imagens de PRWH.	56
Figura 17 - Classes de PRWH conforme os pesos da rede M20.	58
Figura 18 - Classes de PRWH conforme os pesos da rede M20TLN1.	60
Figura 19 - Classes de PRWH conforme os pesos da rede MG.	62
Figura 20 - Classes de PRWH conforme os pesos da rede MGLLN4.	64
Figura 21 - Comparação entre as áreas de PRWH Muito Alto das imagens criadas a partir dos pesos das redes M20TLN1 e MGLLN4.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação hidrológica dos solos para as condições brasileiras.	29
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Pesos das AHPs dos especialistas	50
Gráfico 2 - CR das AHPs seis especialistas	50
Gráfico 3 - Comportamento dos valores mínimos, máximos e intervalos de PRWH gerados com base nos pesos dos especialistas, das médias e de Singh, Jha e Chowdary (2017)	51
Gráfico 4 - Comportamento dos valores mínimos, máximos e intervalos de PRWH gerados com base nos pesos das médias, de Singh, Jha e Chowdary (2017) e das RNAs agrupadas por função de ativação e média utilizada como alvo.....	52
Gráfico 5 - Comportamento dos valores mínimos, máximos e intervalos de PRWH gerados com base nos pesos das RNAs que utilizaram com alvo as médias dos especialistas com CR abaixo de 20% agrupadas por função de ativação e número de camada oculta	53
Gráfico 6 - Comportamento dos valores mínimos, máximos e intervalos de PRWH gerados com base nos pesos das RNAs que utilizaram com alvo as médias de todos os especialistas agrupadas por função de ativação e número de camada oculta	54
Gráfico 7 - Comparação das áreas das classes em porcentagem das imagens de PRWH formadas pelos pesos das médias M20 e MG e das redes M20TLN1 e MGLLN4.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala de comparação da AHP.	14
Tabela 2. Matriz de comparação pareada.	14
Tabela 3. Determinação dos pesos.	15
Tabela 4. Valores de RCI para diferentes quantidades de critérios (n).	15
Tabela 5. Funções de ativação.	21
Tabela 6. Número da Curva do Escoamento superficial (CN) em relação às classes de cobertura e uso do solo e HSG.	32
Tabela 7. Matriz de comparação par a par dos critérios.	34
Tabela 8. Matriz de comparação par a par dos subcritérios.	35

Tabela 9. Funções de ativação, saída e sigla.	36
Tabela 10. Configuração das camadas ocultas das RNAs.....	36
Tabela 11. Declividade.....	38
Tabela 12. Densidade de drenagem.....	39
Tabela 13. Cobertura e uso do solo.	41
Tabela 14. Classes de solo.....	43
Tabela 15. HSGs.....	44
Tabela 16. CN.....	46
Tabela 17. Área de influência das estações climatológicas.....	47
Tabela 18. Coeficiente de Escoamento.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>a</i>	- Subcritério alto
<i>A</i>	- Área da microbacia
<i>b</i>	- Subcritério baixo
<i>CI</i>	- Índice de consistência
<i>CQ</i>	- Coeficiente de Escoamento
<i>CR</i>	- Coeficiente de consistência
<i>D</i>	- Declividade
<i>DD</i>	- Densidade de drenagem
<i>f(net)</i>	- Função de ativação (transferência)
<i>I_a</i>	- Abstração inicial
<i>IPRWH</i>	- Índice de potencial de RWH
<i>J_{Cn/Cn}</i>	- Julgamento de importância de cada critério da linha em relação a cada critério da coluna
$\sum L$	- Comprimento total dos cursos d'água
<i>m</i>	- Subcritério moderado
<i>ma</i>	- Subcritério muito alto
<i>n</i>	- Número de elementos
<i>net</i>	- Produto escalar dos vetores de peso e de entrada

O	- Fluxo do sinal de saída do neurônio
P	- Precipitação
P_D	- Peso da declividade
P_{DD}	- Peso da densidade de drenagem
P_{CQ}	- Peso do coeficiente de escoamento
P_{SD}	- Camada reclassificada com os pesos dos subcritérios da declividade
P_{SDD}	- Camada reclassificada com os pesos dos subcritérios da densidade de drenagem
P_{SCQ}	- Camada reclassificada com os pesos dos subcritérios do coeficiente de escoamento
Q	- Escoamento superficial
RCI	- Índice de consistência aleatória
S	- Potencial máximo de retenção
T	- Matriz transposta
w_j	- Peso do vetor
x_j	- Vetor de entrada
x_n	- Fluxo do sinal das entradas
θ	- Unidade de limite linear
$\lambda_{\max}$	- Autovalor principal
v	- Campo local induzido
$\varphi(v)$	- Funções de transformação

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	- <i>Analytic Hierarchy Process</i>
CN	- Número da curva do escoamento superficial
DOS	- <i>Dark Object Subtraction</i>
DSS	- <i>Decision Support System</i>
GIS-MCDA	- <i>Geographic Information System-based Multicriteria Decision Analysis</i>
HEC-HMS	- <i>Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System</i>
HSG	- <i>Hydrological Soil Group</i>
MCDA	- Análise de Decisão Multicritério

MDE	- Modelo de Elevação
MLP	- <i>Multilayer Perceptron</i>
MODA	- <i>Multiobjective Decision Analysis</i>
NDVI	- <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OLI	- <i>Operational Land Imager</i>
PRWH	- Potencial de RWH
RFB	- <i>Radial Basis Function Network</i>
RNA	- Rede Neural Artificial
RHADESS	- <i>RWH Decision Support System</i>
RWH	- <i>Rainwater Harvesting</i>
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SOFM	- <i>Self-organizing Feature Maps</i>
SR	- Sensoriamento Remoto
SRTM	- <i>Shuttle Radar Topographical Mission</i>
TM	- Modelo Thornthwaite-Mather

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1 OBJETIVOS.....	03
1.1.1 Objetivo Geral.....	03
1.1.2 Objetivos específicos.....	03
1.2 JUSTIFICATIVA.....	04
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	11
2.1.1 AHP.....	13
2.2 REDE NEURAL ARTIFICIAL.....	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	23
3.2 METODOLOGIA.....	25
3.2.1 Declividade do terreno.....	26
3.2.2 Densidade de drenagem.....	27
3.2.3 Coeficiente de escoamento.....	27
3.2.4 Ponderação dos critérios e subcritérios pela AHP.....	34
3.2.5 Combinação dos pesos dos critérios com RNA.....	35
3.2.6 Cálculo do potencial de RWH.....	37
4. RESULTADOS.....	38
4.1 CRITÉRIOS.....	38
4.1.1 Declividade.....	38
4.1.2 Densidade de drenagem.....	39
4.1.3 Coeficiente de escoamento.....	40
4.2 PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS.....	49
4.3 COMBINAÇÃO DOS PESOS DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS COM RNA.....	50
5. CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
APÊNDICE A.....	73

1. INTRODUÇÃO

Espera-se que entre 2011 e 2050 a população mundial passe de sete para 9,3 bilhões de habitantes. Acredita-se ainda que a população urbana quase dobre em relação à rural e haja um aumento no consumo de mercadorias. Esses fatores vêm para agravar a já delicada situação dos recursos hídricos (WWAP, 2016). No Brasil, apesar da água ser abundante, esta é distribuída de forma heterogênea, tanto espacialmente quanto sazonalmente. O regime de chuva na maior parte do país é dividido em uma estação de seca e uma chuvosa. Há também uma variação de ano para ano, tendo anos mais chuvosos e anos mais secos em cada região, como foi o caso de 2015, quando as precipitações verificadas no Sudeste foram abaixo da média e nas regiões Norte e Sul foram acima da média (ANA, 2016).

Dentre os biomas brasileiros, os que mais merecem atenção quanto à disponibilidade de água são aqueles situados nos domínios morfoclimáticos como o Cerrado. O Cerrado apresenta clima tropical, caracterizados por verões chuvosos e invernos secos (COUTINHO, 2006). No Cerrado, a partir da década de 1970, com a implementação de políticas para a ampliação das fronteiras agrícolas. Com isso ocorreu a degradação das nascentes por meio do uso intensivo da irrigação, principalmente para as culturas de inverno, que no Brasil correspondeu a 75%, no ano de 2015. A bacia do rio Paranaíba, na qual o rio Uberabinha está incluído, está entre as que sofrem grande estresse hídrico ligado à irrigação (ANA, 2016). Outra particularidade do cerrado são as chuvas concentradas no verão. Isso unido com a remoção da vegetação natural para o estabelecimento de pastagens e lavouras e a impermeabilização do solo nas áreas urbanas, proporcionam maior velocidade de escoamento superficial, redução na infiltração da água no solo e aumento no risco de inundação (VERGÜTZ, 2016).

Devido à sazonalidade da água no Cerrado é importante a adoção de técnicas para aumentar a eficiência no consumo e coleta, reaproveitar os efluentes e utilizar a água da chuva de forma mais eficiente. Apesar do reuso de água derivada do tratamento de esgoto ter ganhado força e alcançado uma gama maior de usos, ainda é necessário que haja um

maior entendimento e controle dos parâmetros microbiológicos e químicos da água para se saber e minimizar os riscos de contaminação com uso de efluente tratado (HUERTAS et al., 2008). Outra possibilidade é a recarga artificial de aquífero como forma de aumentar a disponibilidade e melhorar a qualidade das águas subterrâneas (MOECK et al., 2017). Esta técnica pode ser utilizada ainda como forma de regular o fluxo dos cursos de água que dependem da água subterrânea (RONAYNE; ROUDEBUSH; STEDNICK, 2017).

Contudo, uma técnica que tem recebido grande destaque pelo seu baixo custo, simplicidade de aplicação e eficiência é a coleta de água da chuva, conhecida como *Rainwater Harvesting* (RWH) (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017; XJUI, 2009). A RWH tem o potencial de aumentar os níveis dos cursos de água da bacia durante os meses de seca e recarregar os lençóis freáticos, uma vez que aumenta a infiltração no solo da água da chuva. Além disso, reduz o escoamento superficial levando a redução das incidências de inundações e a erosão do solo (XJUI, 2009). Desta forma, a RWH apresenta-se como uma das técnicas de gerenciamento de água eficiente na gestão sustentável dos recursos hídricos. No entanto o planejamento e implementação de projetos de RWH dependem de fatores biológicos, físicos, socioeconômicos e ambientais.

Neste contexto a integração das abordagens do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e da Análise de Decisão Multicritério (MCDA) auxilia na avaliação dos fatores envolvidos para identificação e delimitação de zonas potenciais para RWH (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017). Na MCDA existem várias formas de se organizar e ponderar os critérios a serem analisados sendo uma das mais utilizadas o Processo de Análise Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process* - AHP). A AHP toma como base a ponderação inicial de especialistas para organizar e comparar os fatores considerados importantes nesta avaliação e hierarquiza-los. No entanto, a AHP está sujeita à subjetividade dos especialistas que avaliam os pesos de cada critério uma vez que especialistas de áreas diferentes podem dar pesos diferentes a um mesmo fator. Devido a este problema várias metodologias estão sendo estudadas para minimizar este efeito, entre elas destaca-se o uso da Rede Neural Artificial (RNA) (SCHMIDT; BARBOSA, 2016).

Neste contexto, esta pesquisa adotou a hipótese de que os métodos de inteligência artificial, como as RNAs, podem reduzir a subjetividade na delimitação das áreas com potencial para a implantação de estruturas de RWH. Os critérios utilizados para gerar esta delimitação foram declividade do terreno, densidade da rede de drenagem e coeficiente de escoamento. Estes, por sua vez, foram gerados a partir de dados pluviométricos, modelos de elevação, dados pedológicos e de uso e cobertura do solo. Para que estes dados fossem analisados de uma forma conjunta foi utilizada a Análise Multicritério e para ponderar o valor de cada critério foi utilizada a AHP. Para isso foram aplicados questionários a seis profissionais, de três áreas diferentes ligadas a recursos hídrico. Os pesos atribuídos por esses profissionais foram ponderados pela técnica AHP de forma independente. Após essa ponderação os pesos foram inseridos em conjunto em várias configurações de RNAs para serem normalizados. Por fim foram criados Índices de Potencial de RWH (IPRWH). Esses foram aplicados utilizando as imagens de declividade, densidade de drenagem e coeficiente de escoamento. As imagens resultantes desse processo mostram qual o potencial para RWH de cada pixel da imagem. Esse procedimento foi aplicado à média dos pesos atribuídos pelos especialistas e aos pesos normalizados obtidos a partir das diferentes configurações de RNA. Essas imagens foram então comparadas para que fossem identificadas as diferenças resultantes dos diferentes tratamentos.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Reduzir a subjetividade na delimitação de áreas com potencial para RWH em bacias do domínio morfoclimático do Cerrado.

1.1.2. Objetivos específicos

- A. Identificar os fatores mais relevantes na região do Cerrado Mineiro para identificar áreas com potencial de implantação de estruturas de RWH;
- B. Realizar a ponderação dos fatores por meio de consulta a especialistas usando o protocolo AHP;
- C. Delimitar a RWH comparando os métodos da literatura e os resultados da aplicação da RNA;

- D. Avaliar a relevância estatística dos resultados utilizando a AHP pura e a AHP com diferentes configurações de RNA.

1.2. JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a preocupação atual com os recursos hídricos é necessário que sejam avaliadas técnicas alternativas para a gestão dos mesmos. Apesar da RWH ser de baixo custo e de fácil implantação, a sua eficiência depende da análise de múltiplos fatores na fase de planejamento. Tendo isso em vista, a Análise multicritério, baseada em SIG, tem se destacado neste propósito, impulsionando estudos para avaliar e refinar a sua aplicação. Dentro desta técnica utiliza-se a AHP como forma de se ponderar os critérios analisados. No entanto, encontram-se questionamentos a respeito desta técnica na literatura principalmente no que diz respeito à sua incapacidade de avaliar a subjetividade do especialista. Com isso em vista estudam-se alternativas a este problema, entre elas, a RNA.

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: apresenta a contextualização sobre o tema, os objetivos e a justificativa.
- Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica sobre RWH, MCDA, SIG e RNA.
- Capítulo 3: descreve a área de estudo os materiais e a metodologia utilizada.
- Capítulo 4: apresenta a discussão dos resultados obtidos.
- Capítulo 5: apresenta a conclusão obtida a partir dos resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A água é fundamental para todos os setores da sociedade, principalmente para aqueles que dependem dela na cadeia de produção, pois a sua disponibilidade pode interferir na produtividade (WWAP, 2015). As mudanças climáticas, o crescimento acelerado da população, mudanças rápidas no uso da terra e a já degradada qualidade dos recursos hídricos podem intensificar a falta de água, aumentar as preocupações ambientais e econômicas existentes. À medida que aumenta a demanda sobre os recursos hídricos, globalmente e localmente, torna-se necessária uma gestão mais eficiente para atender a todas as demandas (XJUI, 2009). A água da chuva é uma fonte alternativa que se destaca pelo baixo custo, facilidade de coleta e baixa necessidade de tratamento. A coleta da água da chuva, conhecida como *Rainwater Harvesting* (RWH) tem potencial para ser utilizada em áreas urbanas e rurais, o seu uso pode ser residencial, industrial ou agrícola. Além do potencial de aumentar a disponibilidade de água a sua implantação pode reduzir a carga de contaminantes nos corpos d'água, o risco de erosão, enchentes e secas. Além disso, no meio urbano ela tem o potencial de diminuir a sobrecarga da rede de água pluvial (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017).

Normalmente a RWH tem sido vista apenas com uma técnica para coletar água potável dos telhados ou para coletar e armazenar água em tanques para irrigação em áreas rurais, no entanto, o aproveitamento de águas pluviais tem perspectivas muito mais amplas, em particular se for considerada em relação ao seu papel no apoio aos aspectos ambientais (XJUI, 2009). Ainda segundo esse autor uma análise mais detalhada mostra que a RWH tem muitos outros impactos, tanto positivos como negativos. Podem ser destacados como pontos positivos o aumento da infiltração da chuva, possibilitando a recarga dos lençóis freáticos e com isso aumentando o abastecimento de água nos rios, efeito regulador de afetar a distribuição temporal da água na paisagem, reduzindo os fluxos rápidos e a incidência de inundações, a erosão do solo e o auxílio na depuração de contaminantes devido ao aumento do fluxo. Como ponto negativo deve-se destacar a possibilidade de formação de habitat para a criação de vetores de doenças (XJUI, 2009).

No meio rural, o uso de tecnologias eficientes em água, como a RWH, ou as técnicas de irrigação, que são eficientes em consumo de água, permite que os pequenos produtores produzam culturas de alto valor, como vegetais ou frutas, principalmente em regiões com chuvas escassas, ou com má distribuição. Promover a boa gestão da água na propriedade pode aumentar o tempo em que a água fornecida pela chuva estará disponível (WWAP, 2016). Já no meio urbano, o uso da RWH, telhados verdes e outras infraestruturas verdes tem um impacto direto na redução do consumo de água, além de reduzir o risco de inundação através do aumento e descentralização do armazenamento, reduzindo o consumo de energia através do resfriamento evaporativo e melhorando o ambiente urbano (WWAP, 2016).

A RWH e a recarga artificial de água subterrânea são temas que caminham juntos. Armazenar a água da chuva em aquíferos protege essa água de contaminações, da evaporação e repõe o nível dos aquíferos. No entanto, para que a coleta e a distribuição da água da chuva sejam eficientes é necessário que sejam analisados tanto aqueles fatores que irão indicar a disponibilidade da água para coleta no local, como aqueles ligados à proximidade de fontes consumidoras dessa água. Em relação à disponibilidade da água destacam-se a declividade, as características da cobertura vegetal e as propriedades hidrológicas do solo, uma vez que se o terreno for plano, a área tiver uma cobertura vegetal densa e o solo for demasiadamente permeável não haverá escoamento superficial e água proveniente da chuva irá percolar naturalmente (SCS, 1989). Por outro lado, ainda segundo esse mesmo autor, se o terreno tiver uma maior declividade, a cobertura vegetal for mais esparsa e o solo for menos permeável essa água escoará rapidamente podendo desencadear processos erosivos e inundações.

O objetivo das estruturas de RWH é coletar esta água de forma a evitar os efeitos negativos desse escoamento rápido e aumentar a sua permanência nos locais de coleta de forma que a mesma possa ser utilizada nos períodos de estiagem. No que diz respeito à distribuição da água coletada, para que a RWH seja economicamente viável é necessária que as estruturas de coleta estejam próximas das demandas para que não haja alto custo nesse transporte. Essa demanda pode ser a dessedentação animal, irrigação, consumo humano ou industrial. Quando não há essa fonte de consumo próxima uma alternativa é

se fazer tanques de percolação para se evitar os efeitos negativos do escoamento superficial e quando a geologia do local permitir fazer a recarga das águas subterrâneas.

Gupta, Deelstra e Sharma (1997) foi um dos primeiros trabalhos que se propuseram a estudar o potencial de RWH com base em informações espaciais, com o objetivo de aplicar esta técnica a grandes áreas do semiárido na Índia. Estes autores utilizaram informações sobre a topografia para delimitar as bacias e gerar dados de declividade, imagens de satélite para gerar o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), utilizado para analisar a cobertura e uso do solo e dados sobre o solo. Os mesmos utilizaram o método SCS (1989) modificado para estimar o escoamento superficial produzido por tempestades individuais e assim gerar o potencial de escoamento anual para cada bacia. A partir do cálculo do escoamento potencial foram priorizadas as áreas com potencial de escoamento suficiente para aproveitamento da água da chuva e a partir dos dados de uso do solo as áreas com disponibilidade para a implantação de estrutura para coleta e armazenamento da água da chuva.

O potencial de recarga artificial de água subterrânea em um aquífero costeiro no Irã foi estudado por Ghayoumian et al. (2007). Os autores utilizaram dados de declividade, taxa de infiltração, profundidade de água subterrânea, qualidade dos sedimentos aluvial e uso do solo. Estes dados foram ponderados e posteriormente integrados em ambiente SIG com o uso de lógica booleana e fuzzy. Para delimitar as áreas com maior potencial para recarga de água subterrânea estes autores utilizaram a relação entre unidades geomorfológicas e locais apropriados para recarga.

O uso de um sistema de suporte a decisão baseado em SIG, conhecido por *Decision Support System* (DSS), foi aplicado por MBILINYI et al. (2007) em uma região semiárida da Tanzânia para identificar locais com potencial para a implantação de estruturas de RWH. Os autores utilizaram técnicas de sensoriamento remoto e levantamento de campo para gerar dados de precipitação, declividade, textura e profundidade do solo, drenagem e uso e cobertura do solo, que foram utilizados com dados de entrada no DSS. Como

dados de saída foram estimadas as estruturas adequadas para cada local de acordo com as características analisadas.

Os fatores sociais foram levados em conta na determinação de RWH utilizando ferramentas SIG, na África do Sul, no trabalho de Mwenge Kahinda et al. (2008). Foram diferenciados os tipos de RWH entre *in-situ*, *ex-situ* e doméstico, o primeiro consiste em pequenos poços ou sulcos próximos aos locais de plantio de forma a aumentar a umidade do solo e, portanto, da plantação. O segundo consiste no armazenamento de superfície para uso posterior e necessariamente não está no mesmo local de consumo. A água coletada pela RWH *ex-situ* pode ser utilizada para a dessedentação animal, consumo humano e irrigação no período de estiagem, bem como servir de redutor do escoamento superficial e prevenir a ocorrência de processos erosivos e inundações. O RWH doméstico consiste na coleta da água dos telhados para uso na própria residência ou estabelecimento (industrial, comercial ou rural). Esses autores utilizaram como fatores para determinação do potencial para implantação de estruturas de RWH a precipitação, relação entre precipitação e escoamento superficial, cursos d'água intermitentes, declividade, culturas agrícolas, textura, estrutura e profundidade do solo e fatores socioeconômicos como densidade populacional, força de trabalho, prioridade da população, experiência com RWH, posse da terra, legislação sobre os recursos hídricos, acessibilidade e custos relacionados.

Ainda na África do Sul, foi criado o *Rainwater Harvesting Decision Support System* (RHADESS) (MWENGE KAHINDA et al., 2009), um sistema baseado em SIG que além de indicar a viabilidade da implantação do RWH, em qualquer parte da África do Sul, tem a função de quantificar os impactos hidrológicos que a sua implantação, em diferentes níveis, pode ocasionar para o escoamento superficial. Este modelo ainda indica qual o tipo de RWH é indicado para cada local se *in-situ*, *ex-situ* ou doméstico.

Para implementar reservas de água em uma bacia na região semiárida da Índia Ramakrishnan, Bandyopadhyay e Kusuma (2009) propuseram a coleta de água de escoamento superficial em estruturas como barragem de contenção, tanques de percolação, lagos de armazenamento, poços e barragens subterrâneas. Para a identificação

das áreas viáveis para estas estruturas, esses autores utilizaram a técnica da árvore de decisão baseada em SIG. Como dados de entrada foram utilizados o potencial de escoamento, a declividade, os padrões de fraturas e a área da microbacia. Foi utilizado o método de obtenção do escoamento CN-SCS (1989) e calculou-se o coeficiente de escoamento que é a relação entre o escoamento e a precipitação. Para aumentar a eficiência do armazenamento os autores utilizaram parâmetros como armazenamento efetivo e permeabilidade da massa rochosa.

O modelo Thornthwaite-Mather (TM), que calcula o balanço hídrico para a zona raiz a partir da temperatura e da precipitação, foi utilizado por Singh, Singh e Litoria (2009) para identificar áreas viáveis para estruturas de coleta de água por meio de técnicas de SR e SIG em uma bacia no estado indiano de Punjab. Os autores utilizaram dados de uso e cobertura do solo, grupos hidrológicos do solo, conhecidos como *hydrological soil group* (HSG), declividade e modelo de elevação (MDE).

A demarcação de zonas com potencial de recarga e aptidão para a implantação de estruturas para recarga artificial de água subterrânea, em uma bacia no sul da Índia, utilizando o método de sobreposição ponderada multiparâmetro baseada em SIG foi utilizada por Kaliraj, Chandrasekar e Magesh (2015). Para isto esses autores fizeram a integração entre ferramentas de sensoriamento remoto (SR) e SIG utilizando os pesos de diversos parâmetro, tais como declividade, densidade de drenagem, profundidade e permeabilidade do solo, precipitação, níveis e variação dos níveis da água subterrânea e transmissividade do aquífero para avaliar a permeabilidade e a capacidade de infiltração.

O RWH urbano foi utilizado por Akter e Ahmed (2015) para identificar áreas viáveis em uma área de Chittagong em Bangladesh, em um cenário com um período anual de secas e um de inundações. Os fatores analisados foram: área de telhado, declividade, densidade de drenagem e coeficiente de escoamento. Para simular o processo de precipitação/escoamento em um sistema de drenagem urbano, foi utilizado o *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) e suas demais extensões com suporte a SIG. A análise multicritério baseada em AHP foi utilizada primeiro para identificar zonas potenciais para a RWH, combinando os fatores de dados de solo, uso e

cobertura de solo, declividade, coeficiente de escoamento e excedente de precipitação. Os autores realizaram o ranqueamento par a par da AHP. Contudo, apesar das vantagens dos procedimentos de avaliação par a par essa metodologia pode levar a resultados inconsistentes, para minimizar este problema fez-se uma análise sistemática através de uma matriz de comparação na qual cada linha e cada coluna estava relacionada a um elemento.

A combinação linear ponderada com lógica booleana foi utilizada por (STEINEL et al., 2016) a fim de avaliar o escoamento superficial e o potencial de coleta e infiltração desse em bacias hidrográficas no norte da Jordânia. Neste trabalho, além dos fatores que contribuem para a recarga do aquífero como precipitação, tamanho das sub-bacias, topografia, estruturas de RWH existentes, cobertura do solo, solo, hidrogeologia, espaço de armazenamento do aquífero e falhas geológicas, foram analisados os fatores que a restringem.

Singh, Jha e Chowdary (2017) utilizaram a integração entre Análise de Decisão Multicritério, conhecida como *MultiCriteria Decision Analysis* – (MCDA), com ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o planejamento de locação de estruturas de RWH e recarga artificial de aquífero. A metodologia proposta foi aplicada no canal localizado no alto da Bacia do rio Damodar, no leste da Índia. A primeira etapa do estudo foi a delimitação das áreas com potencial para coleta de água da chuva, em seguida delimitaram-se as áreas de demanda e por fim foram identificados os locais adequados para a implantação das estruturas de RWH.

Os critérios escolhidos para a delimitação das áreas potenciais para coleta de água de chuva foram a declividade do terreno, a densidade da rede de drenagem e o coeficiente de escoamento superficial (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017). Os dois primeiros critérios foram obtidos a partir de dados do modelo numérico do terreno SRTM. O coeficiente de escoamento, por sua vez, é a relação entre a precipitação e o escoamento superficial, este foi calculado pelo método SCS (curva CN). O método SCS permite o cálculo do escoamento superficial a partir do grupo hidrológico do solo (HSG), uso e cobertura do solo e precipitação (SARTORI; GENOVEZ; LOMBARDI NETO, 2005a).

Segundo esses autores este método destaca-se devido à simplicidade e disponibilidade de informações para a sua aplicação.

Para que os critérios possam ser analisados em conjunto na delimitação do potencial de RWH foi utilizada a técnica *Analytic Hierachy Process* (AHP), proposta por Saaty (1990). Esta técnica consiste na ponderação dos pesos atribuídos por especialistas, que avaliam a importância que cada critério possui em relação aos demais. A partir dos pesos resultantes da AHP foi criado o mapa de áreas potenciais para RWH (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017).

Todos estes trabalhos demonstram que a RWH é essencialmente um problema espacial e, por isso, tem uma profunda integração com as representações cartográficas para análise da distribuição dos fatores envolvidos e a forma de combiná-los. Nesse sentido, os Sistemas de Informação Geográfica são um grande destaque na manipulação e análise de dados cartográficos para definir as áreas potenciais de RWH.

2.1. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possuem a capacidade de armazenar e manipular dados de natureza espacial. Podem ser vistos como um tipo especial de banco de dados com a capacidade de lidar com dados geográficos, um conjunto de ferramentas e algoritmos para manipular dados geográficos ou como uma sequência de processos de coleta, armazenamento e manipulação de dados geográficos (CÂMARA et al., 1996).

Segundo Lang e Blaschke (2009), os SIG utilizam dois tipos principais de formatos de dados para representar os elementos geográficos: vetorial e matricial. Estes autores afirmam que, o formato vetorial é mais apropriado para descrever objetos claramente delimitados e utiliza elementos geométricos como pontos, linhas e polígonos como forma de representação. Nos SIG esses dados ainda podem vir acompanhados de informações descritas em forma tabular, qualitativas ou quantitativas, sobre os seus elementos. Ainda segundo Lang e Blaschke (2009), o formato matricial é mais apropriados para representar fenômenos espaciais com ocorrência contínua. Nesse formato, o pixel ou célula é a

unidade básica e a sua formação se dá por geração de superfícies com o uso de técnicas de interpolação. Os elementos principais dessa forma de representação são as suas coordenadas de origem, o tamanho das células ou resolução espacial, o número de linha e colunas e o valor da célula.

Além de apresentarem característica e aplicações diferentes, os formatos vetorial e matricial apresentam formas diferentes de serem analisados. Enquanto a análise dos primeiros se dá pelas relações entre as formas geométricas, que demandam um grande esforço de programação (LONGLEY et al., 2009), o segundo apresenta uma maior simplicidade em sua análise, uma vez que são utilizadas operações de álgebra simples, conhecidas como álgebra de mapas, contudo, demanda alto esforço computacional, tanto para armazenamento quanto para processamento. Ainda segundo os mesmos autores, devido a esta maior simplicidade de processamento, o formato matricial, também chamado no Brasil pela sua tradução do inglês *raster*, é mais utilizado na modelagem espacial, esta por sua vez consiste na simulação de processos que acontecem no mundo real. Os modelos espaciais dependem da variação espacial do elemento a ser modelado no espaço e podem ser criados para se investigar cenários ideais ou como uma forma de encontrar índices que possam mensurar determinado evento. Os modelos podem ser divididos em várias categorias de acordo com as suas principais características e aplicações, no entanto, no contexto deste trabalho, duas categorias são mais adequadas, a dos modelos estáticos e indicadores e a da modelagem cartográfica e álgebra de mapas. A primeira caracteriza-se por permitir a combinação de uma grande variedade de entradas em uma única saída ou índice, já a segunda é caracterizada por operações matemáticas simples, célula a célula no elemento matricial e a associação entre várias matrizes de forma a se chegar ao resultado desejado (LONGLEY et al., 2009).

A locação de áreas propícias para a implantação de estruturas de RWH, é um problema complexo que envolve diferentes fatores de natureza espacial daí o interesse crescente de se estudar o uso técnicas relacionadas a sistemas de tomada de decisão multicritério nesta temática. A Análise de Decisão Multicritério, conhecida como *Multicriteria Decision Analysis* (MCDA), utiliza os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para integrar os dados espaciais de entrada e produzir um produto que responde uma série de

considerações providas por especialistas. Cada organização particular dos critérios e valores ponderados é chamada de cenário. Os problemas envolvendo informações espaciais englobam um grande número de critérios, esses podem ser quantitativos ou qualitativos, daí a importância da *Geographic Information System-based Multicriteria Decision Analysis* (GIS-MCDA). Pois, com o auxílio dos tomadores de decisão, permite que esses critérios sejam avaliados e processados de forma que no fim se obtenham mapas com as informações necessárias para a tomada de decisão (MALCZEWSKI, 2010). O termo MCDA pode ainda ser dividido em *Multiattribute Decision Analysis* (MADA), quando o problema é predeterminado e existe uma quantidade limitada de alternativas e *Multiobjective Decision Analysis* (MODA), quando o problema é contínuo e se escolhe uma solução em uma gama de soluções possíveis (MALCZEWSKI, 2006).

2.1.1 AHP

Um dos grandes problemas no GIS-MCDA é a forma de combinar as informações espaciais. Trabalhos recentes têm focado nessas combinações de forma a que elas representem o problema da maneira mais realista possível. Segundo Schmidt e Barbosa (2016), existem várias formas de se organizar e ponderar os critérios a serem analisados dentro da MCDA, sendo uma das mais utilizadas é a *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Os autores avaliaram a consistência e a relativização dos fatores analisados para atribuir pesos a cada camada de informação representada no SIG. Na AHP os critérios são organizados em uma estrutura hierárquica na qual cada elemento representa um fator diferente do problema e estes serão avaliados e elencados de acordo com sua importância (SAATY, 1990). Nesta técnica, uma vez pareados todos os fatores avaliados por especialistas, um algoritmo determina o autovetor da matriz dominante, que representa os valores de ponderação de cada camada de informação avaliada. Essa técnica tem ganhado destaque em diversas áreas por permitir que especialistas opinem de forma subjetiva em um tratamento de dados puramente matemático.

A primeira etapa da AHP é o julgamento dos critérios por especialistas que analisam os critérios em pares de acordo com a importância que o primeiro tem em relação ao segundo (SAATY, 1977), como é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Escala de comparação da AHP.

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Fraca importância de um sobre o outro	Experiência e julgamento levemente a favor de uma atividade sobre a outra
5	Importância forte ou essencial	Experiência e julgamento fortemente a favor de uma atividade sobre a outra
7	Importância evidente	Uma atividade é fortemente favorita em relação a outra e isto pode ser demonstrado na prática
9	Importância absoluta	A evidência que favorece uma em relação a outra é da mais alta ordem de afirmação
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando é necessário compromisso

Fonte: Traduzido de Saaty (1977).

A segunda etapa é montar a matriz de comparação pareada (Tabela 2). Nesta etapa podem ser observados os julgamentos (J) de importância de cada critério (C_n) da linha em relação a cada critério da coluna na forma J_{C_n/C_n} .

Tabela 2. Matriz de comparação pareada.

Critérios	C_1	C_2	C_3	C_n
C_1	1	$1/J_{C_2/C_1}$	$1/J_{C_3/C_1}$	$1/J_{C_n/C_1}$
C_2	J_{C_2/C_1}	1	$1/J_{C_3/C_2}$	$1/J_{C_n/C_2}$
C_3	J_{C_3/C_1}	J_{C_3/C_2}	1	$1/J_{C_n/C_3}$
C_{ij}	J_{C_n/C_1}	J_{C_n/C_2}	J_{C_n/C_3}	1

Fonte: Adaptado de Schmidt e Barbosa (2016).

Após a elaboração da matriz de comparação pareada os julgamentos são analisados de forma a que sejam obtidos os pesos de cada um deles. A primeira etapa deste processo é somar os valores de cada coluna ($\sum C_i$), em seguida cada julgamento é dividido pela soma de sua respectiva coluna ($J_{ci/cj}/\sum C_i$) por fim os valores de cada uma dessas novas linhas são somados e divididos pelo número total (n) de critérios ($\sum C_i/n$). Dessa forma são obtidos os pesos normalizados para cada critério, sendo que os valores variam entre zero

e um e a soma de todos os valores é um (SAATY, 1977), como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3. Determinação dos pesos.

	C ₁	C ₂	C ₃	C _n	Pesos
C ₁	$1/\sum C_1$	$(1/J_{C2/C1})/\sum C_2$	$(1/J_{C3/C1})/\sum C_3$	$(1/J_{Cn/C1})/\sum C_{ij}$	$\sum C_1/n$
C ₂	$(J_{C2/C1})/\sum C_1$	$1/\sum C_2$	$(1/J_{C3/C2})/\sum C_3$	$(1/J_{Cn/C2})/\sum C_{ij}$	$\sum C_2/n$
C ₃	$(J_{C3/C1})/\sum C_1$	$(J_{C3/C2})/\sum C_2$	$1/\sum C_3$	$(1/J_{Cn/C3})/\sum C_{ij}$	$\sum C_3/n$
C _n	$(J_{Cn/C1})/\sum C_1$	$(J_{Cn/C2})/\sum C_2$	$(J_{Cn/C3})/\sum C_3$	$1/\sum C_n$	$\sum C_n/n$
$\sum$ Colunas	$\sum C_1$	$\sum C_2$	$\sum C_3$	$\sum C_n$	$\sum \text{Pesos} = 1$

Fonte: Adaptado de Schmidt e Barbosa (2016)

Para verificar a consistência da avaliação dos pesos atribuídos é utilizado o Coeficiente de Consistência, dado pela Equação 1:

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (1)$$

Onde, CR é o coeficiente de consistência, RCI é o índice de consistência aleatória e CI é o índice de consistência, de acordo com a seguinte Equação 2:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Onde, λ_{max} é o autovalor principal calculado pela técnica de autovetor e n é o número de critérios. Para que se tenha consistência é recomendado que o valor de CR seja menor que 10% (SAATY, 1990). O valor do RCI é obtido de acordo com a quantidade de critérios utilizados, como é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de RCI para diferentes quantidades de critérios (n).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RCI	0,0	0,0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Fonte: Triantaphyllou e Mann (1995).

Segundo Schmidt e Barbosa (2016) o CR pode ocultar inconsistências devido a problemas no cálculo do vetor prioridade, podendo assim, ser ineficiente na detecção de problemas

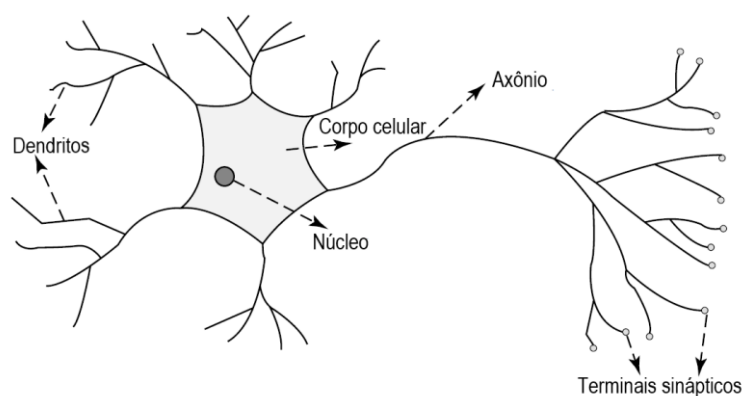
relativos à subjetividade dos especialistas. Tendo isto em vista, estes mesmo autores propuseram a utilização de RNA como uma forma de agregar os dados dos especialistas e filtrar os dados que comporão a matriz dominante da AHP.

2.2. REDE NEURAL ARTIFICIAL

O cérebro humano tem a capacidade de processar informações de forma complexa, não linear e paralela, com uma velocidade de processamento extremamente alta. Tendo isto em vista, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) foram projetadas para simular esse processo de forma matemática, em sistemas computacionais (HAYKIN, 2001).

O cérebro humano tem a capacidade de reconhecer padrões e controlar atividades devido uma rede de neurônios interconectados. Os neurônios são células que possuem a capacidade de receber, processar e transmitir informações. São formados por corpo celular, núcleo, dendritos, axônio e terminais sinápticos como é ilustrado na Figura 1. A transmissão de sinais se dá pelas sinapses que é um processo químico pelo qual uma substância transmissora é liberada na extremidade de envio da junção nos terminais sinápticos, o efeito da transmissão consiste em diminuir ou aumentar o potencial elétrico dentro da célula receptora, se o potencial atinge um limite o pulso é enviado pelo axônio da célula e a célula é “disparada” (ABRAHAM, 2005).

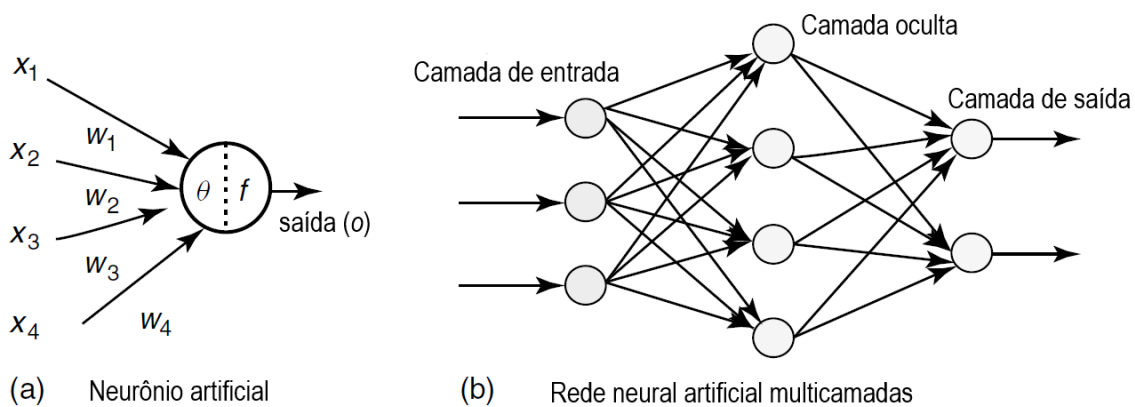
FIGURA 1 - Estrutura de um neurônio de mamífero.



Fonte: Traduzido de Abraham (2005).

Ainda segundo esse autor, as redes neurais artificiais têm os neurônios artificiais ou nós como elementos básicos. Os efeitos das sinapses são representados pelos pesos das conexões que modulam os efeitos associados aos sinais de entrada. As características não lineares e os impulsos dos neurônios são representados pela função de transferência (ou ativação), que por sua vez é calculada como a soma dos pesos dos sinais de entrada. A arquitetura básica das redes neurais consiste em três camadas: entrada, oculta e saída. O neurônio artificial e a rede neural artificial são representados na Figura 2.

FIGURA 2 - Estrutura do neurônio artificial e da rede neural artificial.



Fonte: Traduzido de Abraham (2005).

O fluxo do sinal das entradas, x_1 a x_n são unidirecionais, assim como o fluxo do sinal de saída do neurônio (O), como pode ser observado na Equação 3 (ABRAHAM, 2005):

$$O = f(net) = f\left(\sum_{j=1}^n w_j x_j\right) \quad (3)$$

Onde w_j é o peso do vetor, $f(net)$ é a função de ativação (transferência) e net é o produto escalar dos vetores de peso (w_j) e de entrada (x_j). O net por sua vez é calculado conforme a Equação 4:

$$net = w^T x = w_1 x_1 + \dots + w_n x_n \quad (4)$$

Onde w^T é a matriz transposta dos pesos individuais de cada fator considerado.

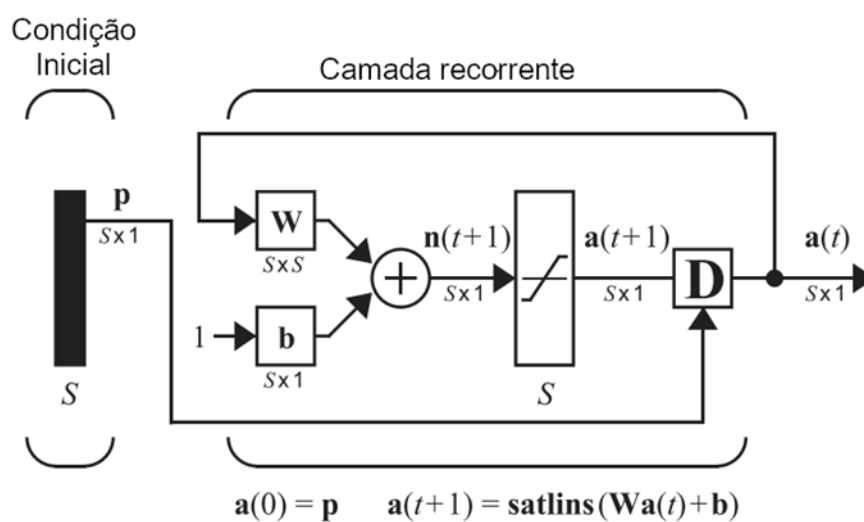
No caso mais simples o valor/vetor de saída O é calculado pela Equação 5:

$$O = f(net) = \begin{cases} 1, & \text{se } w^T x \geq \theta \\ 0, & \text{nos outros casos} \end{cases} \quad (5)$$

Onde θ é o nível limite e este tipo de nó é chamado de unidade de limite linear.

Segundo Bishop (1995), existem dois tipos básicos de arquiteturas de redes neurais, as *feed-forward* e as recorrentes. Nas primeiras, o fluxo do sinal é sempre da entrada para a saída e não existem conexões de retroalimentação. Já nas redes recorrentes existe o *feedback* e por isso as propriedades dinâmicas são importantes nesse tipo de rede. O algoritmo *back-propagation* é uma forma de rede recorrente que é capaz de avaliar os erros através de sua propagação iterativa. Os algoritmos, em geral, utilizam um processo em duas etapas para a minimização do erro. No primeiro momento a propagação do erro é calculada no sentido inverso ao da rede e em uma segunda etapa é feito o ajustamento desse erro, como é mostrado na Figura 3.

FIGURA 3 - Funcionamento do algoritmo *Back-propagation*

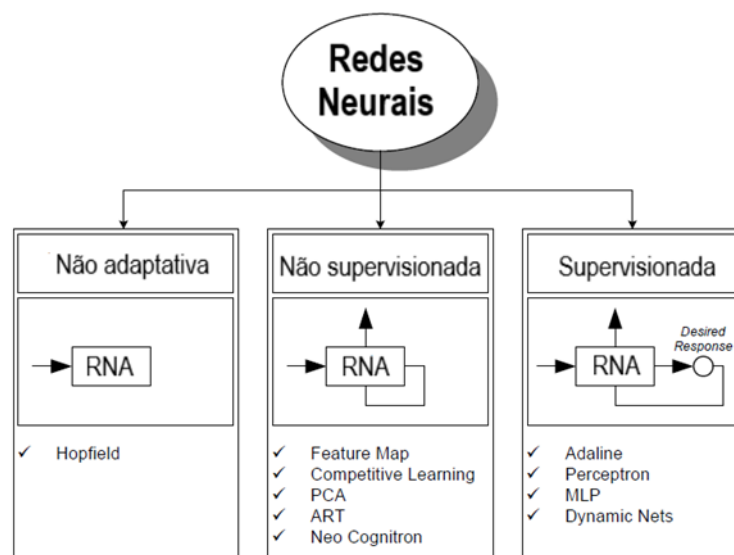


Fonte: Traduzido de Hagan et al. (1996).

Um dos diferenciais das RNAs é a capacidade de aprendizagem, que consiste no ajustamento dos pesos dos sinais de entrada. Esta tem a função de construir um modelo

estatístico capaz de reconhecer dados similares aos apresentados na etapa de treinamento (BISHOP, 1995; HAYKIN, 2001; ABRAHAM, 2005). As redes neurais podem ser classificadas de acordo com o algoritmo de aprendizagem (Figura 4). As formas de aprendizado das redes neurais podem ser divididas em: não adaptativas, quando os pesos são fixos e pré-determinados (BURKE; DAMANY, 1992); não supervisionadas, a aprendizagem ocorre a partir de agrupamentos formados estatisticamente pelo sistema a partir de características encontradas na população de entrada; supervisionadas, amostras das respostas desejadas para cada neurônio de saída são fornecidas por um agente externo na entrada, com uma primeira passada encontram-se as discrepâncias entre respostas desejadas e encontradas, os pesos são alterados de acordo com a regra de aprendizagem.

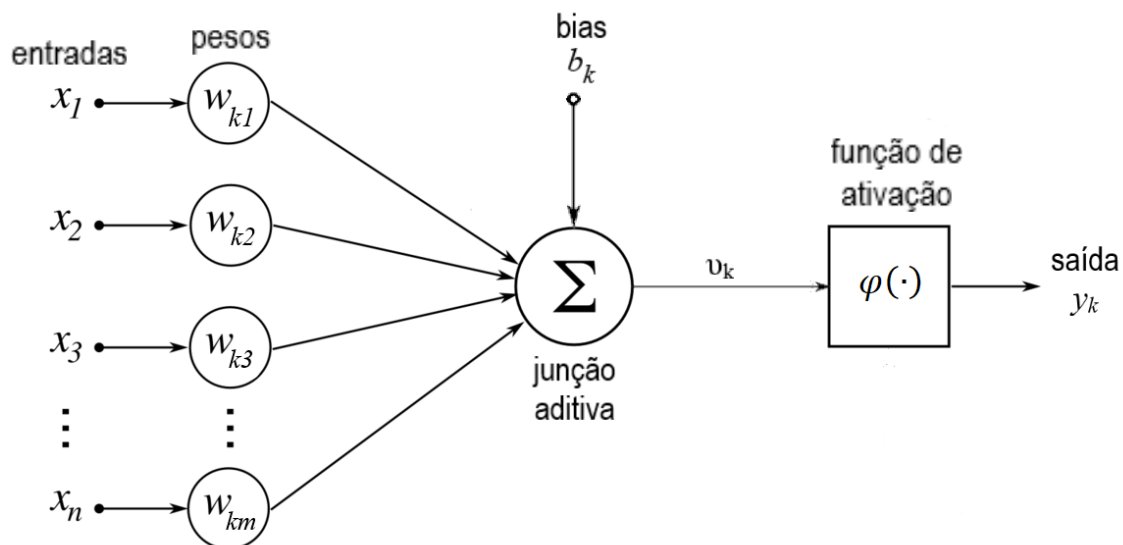
FIGURA 4 - Classificação de acordo com o algoritmo de aprendizagem.



Fonte: Traduzido de Burstein e Holsapple (2008)

As funções de transformação, representadas por $\varphi(v)$, estão em função do campo local induzido v e são responsáveis por definir e restringir a amplitude do sinal saída de um neurônio a um valor finito por meio de uma transformação não linear, conforme é mostrado na Figura 5 (HAYKIN, 2001).

FIGURA 5 - Modelo não-linear de um neurônio.



Fonte: Adaptado de Haykin (2001).

Ainda segundo Haykin (2001), existem três tipos básicos de funções de ativação, como se segue: a de limiar, baseada no modelo de McCulloch, que segue a propriedade “tudo ou nada”, ou seja, a saída do neurônio é 1 se o campo local induzido é não negativo e 0 se for negativa; a linear por partes pode ser vista como uma aproximação de um amplificador linear e o fator de amplificação dentro da região linear é a unidade; sigmoide, que se caracterizam por apresentar gráficos com a forma da letra S, essas funções apresentam um balanceamento adequado entre a forma linear e a não linear. Na Tabela 5 são apresentadas as funções Linear, Sigmoide logarítmica e Sigmoide tangente hiperbólica.

Tabela 5. Funções de ativação.

Nome	Releção Entrada/Saída	Icone	Função do MATLAB
Linear	$a = n$		purelin
Sigmoide logarítmica	$a = \frac{1}{1 + e^n}$		logsig
Sigmoide tangente hiperbólica	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		tansig

Fonte: Traduzido e adaptado de Hagan et al. (1996).

O uso das RNAs no tratamento de informações espaciais vem tendo uma grande disseminação. García, Gámez e Alfaro (2008) propuseram um sistema automatizado para avaliação de propriedades utilizando RNA e SIG. Neste trabalho foram utilizadas redes neurais de *perceptron* multicamada, conhecida como *Multilayer Perceptron* (MLP) e função de base radial, conhecida como *Radial Basis Function Network* (RFB) como alternativa aos métodos tradicionais de regressão e classificação supervisionada nas tarefas de agrupamento. As redes MLP e mapas de feições auto organizáveis, conhecida como *Self-Organizing Feature Maps* (SOFM) foram utilizadas na atribuição de valores perdidos para as variáveis qualitativas.

As RNAs foram utilizadas para modelar as respostas que o fluxo de água de aquíferos sofre de acordo com várias alternativas de gestão de água. Ho, Lin e Lo (2010) propuseram uma metodologia baseada em RNA com dados sísmicos e SIG para avaliar o vazamento de água em dutos. O mapeamento do potencial de produtividade de água subterrânea utilizando SIG e RNA foi feito por Lee et al. (2012). As RNA em ambiente SIG foram utilizadas na análise de susceptibilidade a desmoronamento de terra em minas de carvão abandonadas (LEE; PARK; CHOI, 2012). Gholami, Sebghati e Yousefi (2016) utilizaram RNAs para simular a qualidade da água subterrânea em ambiente SIG.

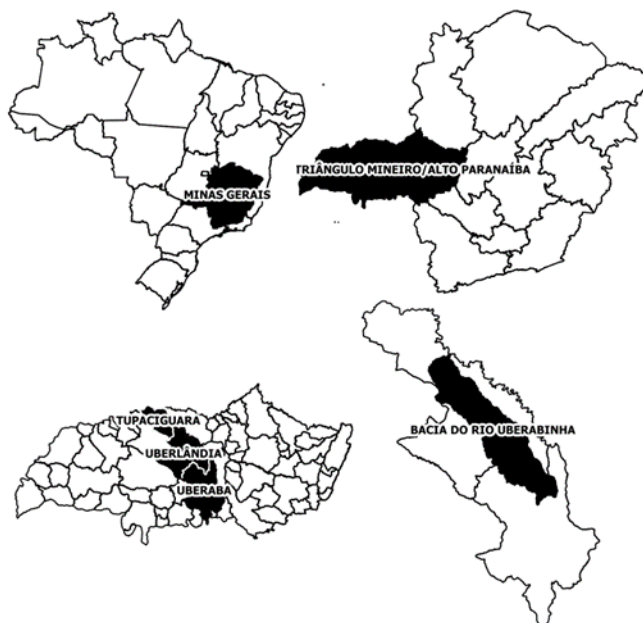
Schmidt e Barbosa (2016) utilizaram RNAs na ponderação inicial do método AHP aplicado ao cálculo de vulnerabilidade ambiental como forma de se reduzir a subjetividade no processo de análise. O algoritmo de treinamento utilizado por esses autores foi o *back-propagation* com a otimização de *Levenberg-Marquardt* que utiliza o erro médio quadrático como função de parada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Uberabinha está localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, abrange o norte do município de Uberaba, onde se localiza a nascente do rio Uberabinha, o município de Uberlândia, onde localiza-se a maior parte da bacia e a porção sudeste do município de Tupaciguara, onde o rio Uberabinha desagua no rio Araguari (Figura 6). Esta área foi escolhida por se tratar de uma bacia que sofre uma grande pressão hídrica, causada tanto pela expansão agrícola quanto urbana em uma área de cerrado (NISHIYAMA, 1998; OLIVEIRA, 2013).

FIGURA 6 - Localização da área de estudo.



Fonte: Autor.

A região na qual está inserida a Bacia do Rio Uberabinha é caracterizada por um clima tropical semiúmido com verão chuvoso e inverno seco. A temperatura anual média está entre 20 e 22°C, as menores temperaturas se concentram em julho e as maiores em novembro. A precipitação média entre 1300 e 1700 mm, sendo que 50% desta

precipitação ocorre no mês de dezembro e o mês com menor precipitação é agosto, nos meses de setembro e outubro ocorrem chuvas isoladas e estas possuem forte relação com a formação dos processos erosivos. O verão se estende de setembro a março, neste período o aquecimento causado pela maior incidência solar sobre o continente faz com que a ação da massa tropical continental seja acentuada impedindo o avanço da massa polar atlântica. Além disso a linha de instabilidade tropical resultante da massa de ar quente proveniente da região amazônica provoca a instabilidade da massa tropical atlântica. A junção desses fatores é responsável pela maior quantidade de precipitação desse período. A interação entre as massas de ar tropical e polar atlântica é a responsável pelo período seco que se estende de abril a setembro. Esta interação, junto às barreiras naturais situadas na faixa litorânea fazem com que as precipitações ocorram nesta faixa e que as massas cheguem no interior do continente mais secas. (NISHIYAMA, 1998)

O tipo de solo predominante encontrado na área e o latossolo vermelho-escuro álico e distrófico encontrado no interflúvio do Rio Uberabinha e seus afluentes, possuem acidez de moderada a forte, elevado teor de alumínio. Nas áreas de relevo plano a suavemente ondulado é encontrado o latossolo vermelho-amarelo álico que são porosos e altamente susceptíveis a erosão. No vale do rio Uberabinha e de seus principais afluentes, nas altitudes inferiores a 850m, são encontrados os latossolos roxos, ricos em óxido de ferro e com elevado teor de argila. Os fundos de vales ou topos de chapadas caracterizam-se por apresentar formas aplanadas e extensas mal drenadas e pouco permeáveis apresentam o solo glei húmico. São encontrados ainda os solos podzólicos vermelho-amarelo caracterizado por apresentar baixa concentração de alumínio, horizonte A chernozômico rico em matéria orgânica, são moderadamente ácidos e possuem textura argilosa a argilo-cascalhenta. (NISHIYAMA, 1998)

A vegetação nativa predominante é o cerrado com áreas de floresta tropical subcaducifólia. São encontrados cinco agrupamentos distintos de vegetação e estes estão ligados à relação entre compartimentação geomorfológica, solos e hidrografia. As superfícies de cimeira são encontradas em áreas com altitude entre 950 e 1050m e apresentam vegetação típica de cerrado *strictu-sensu*. Os vales fluviais amplos, espaçados e húmidos apresentam vegetação típica de campo limpo e mata mesofítica, tanto matas

de galeria quanto de encosta. As áreas com relevo intensamente dissecado características dos vales fluviais apresentam vegetação primitiva a floresta tropical subcaducifólia. As regiões com relevo mediamente dissecado apresentam solos arenosos e predomina o cerrado stricto-sensu. Os fundos dos vales fluviais são locais onde há o afloramento do lençol freático e apresentam vegetações típicas de ambientes de veredas. (NISHIYAMA, 1998).

3.2 METODOLOGIA

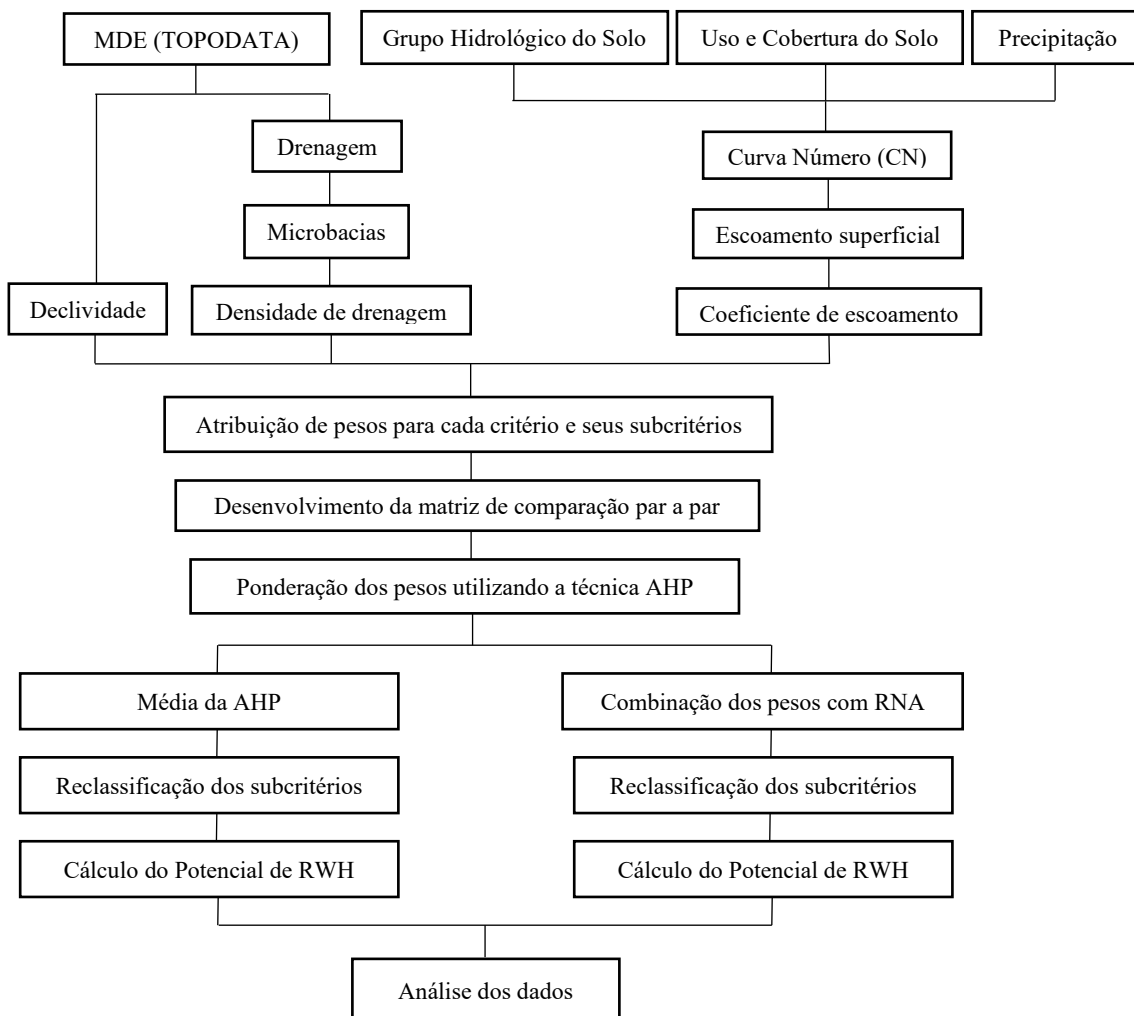
A escolha dos critérios utilizados para gerar a delimitação das áreas potenciais foi baseada no trabalho de Singh Jha e Chowdary (2017). Os critérios utilizados foram: declividade do terreno, densidade da rede de drenagem e coeficiente de escoamento. A declividade e a densidade de drenagem foram obtidas a partir de modelos de elevação. O coeficiente de escoamento foi calculado a partir de dados de uso e ocupação, solo e pluviometria utilizando o método SCS.

Para ponderar o valor de cada critério foi utilizada a AHP. Para isso foram aplicados questionários a seis profissionais, de três áreas diferentes ligadas a recursos hídrico. Os pesos atribuídos por esses profissionais foram ponderados pela técnica AHP de forma independente. Após essa ponderação os pesos obtidos pela técnica da AHP foram inseridos em conjunto em várias configurações de RNAs para identificação de ruídos existentes. Foram considerados duas situações: RNA supervisionadas e não supervisionadas. O objetivo do primeiro teste é verificar a consistência entre os especialistas e do segundo foi avaliar a capacidade da rede em identificar a subjetividade dos especialistas de forma independente.

Por fim foram criados Índices de Potencial de RWH (IPRWH). Esses foram aplicados utilizando as imagens de declividade, densidade de drenagem e coeficiente de escoamento. As imagens resultantes desse processo mostram qual o potencial para RWH de cada pixel da imagem. Esse procedimento foi aplicado à média dos pesos atribuídos pelos especialistas e aos pesos normalizados obtidos a partir das diferentes configurações de RNA. Essas imagens foram então comparadas para que fossem identificadas as

diferenças resultantes dos diferentes tratamentos. O fluxograma da metodologia é mostrado na Figura 7.

FIGURA 7 - Fluxograma de atividades.



Fonte: Autor.

3.2.1 Declividade do terreno

A declividade do terreno interfere na forma e na velocidade com que a água irá escoar ou ser percolada, por isso é um fator que influencia no potencial de RWH. Para a sua determinação foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) do projeto TOPODATA (URL 1) do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) com resolução espacial de 30m. Foram adquiridos os arquivos de MDE contendo a área de estudo (18_48, 18_495, 19_48 e 19_495), estes arquivos foram unidos em um mosaico que foi reprojetoado para a projeção polícônica e Datum horizontal SIRGAS2000 (SRID 5880). Este mosaico foi

ainda convertido para valores inteiros de 64 bits e os valores nulos foram substituídos pelos valores mais próximos. O arquivo *raster* com a declividade em porcentagem foi criado no software Quantum GIS (QGIS). Para ser utilizado na análise do potencial de RWH este arquivo foi reclassificado em quadro classes: baixa, moderada, alta e muito alta.

3.2.2 Densidade de drenagem

A densidade de drenagem (DD) indica a concentração dos cursos de água em uma bacia hidrográfica. Isto reflete na velocidade em que a precipitação será transformada em escoamento superficial. O seu cálculo se de acordo com a Equação 6, conforme o proposto por Horton (1955):

$$DD = \frac{\sum L}{A} \quad (6)$$

Onde $\sum L$ é o comprimento total dos cursos d'água (km) e A é a área da microbacia (km²).

Para o cálculo da densidade de drenagem, foram extraídas a rede de drenagem e as microbacias em formato *raster*, a partir do mosaico do MDE TOPODATA pelo software QGIS. Os dois arquivos foram convertidos para vetor, as drenagens foram codificadas de acordo com a microbacia a qual pertenciam. Em seguida, foram calculados os comprimentos totais das drenagens contidas em cada microbacia e a área das microbacias. Por fim, foi gerado o *raster* das microbacias com o valor da D_d .

3.2.3 Coeficiente de escoamento

O coeficiente de escoamento é a relação entre a quantidade de água precipitada e o escoamento superficial, ou seja, é a quantidade da água precipita que esco na superfície. Para o seu cálculo foi necessário estimar o escoamento direto, o método utilizado foi o SCS (curva CN). Este método utiliza-se do uso e cobertura do solo, Grupos Hidrológicos do Solo (HSG) e precipitação. O motivo da escolha desse método foi a facilidade de aplicação e disponibilidade de dados.

Para a obtenção do uso e cobertura do solo, foi feita a classificação supervisionada do recorte da cena de ponto 221, órbita 073, do dia 24 de maio de 2018, do sensor *Operational Land Imager* (OLI) satélite Landsat-8. O sensor OLI apresenta nove bandas espectrais: 1, *ultrablue* (costeiro/aerossol); 2, azul; 3, verde; 4, vermelho; 5, infravermelho próximo; 6 infravermelho de ondas curtas 1; 7, infravermelho de ondas curtas 2; 8, pancromática; 9, cirro. A banda 8 possui resolução espacial de 15m e as restantes 30m. Neste estudo foram utilizadas as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7. As imagens possuem resolução radiométrica de 16 bits e o tempo de retorno de 16 dias. As imagens foram obtidas a partir do site Earthexplorer do US Geological Service (URL5).

A escolha de se utilizar uma imagem do mês de maio se deu por esse ser um período com menor intensidade de nuvens e presença de culturas da segunda safra, permitindo assim uma maior diferenciação das coberturas vegetais. A imagem tem um processamento nível L1TP, portanto é calibrada radiometricamente, ortorretificada com base em pontos de controle em terra e em modelos de elevação, tendo isto em vista não foi necessário fazer a correção geométrica. As etapas de pré-processamento, coleta de amostras e classificação da imagem foram executadas no complemento SCP do software QGIS.

O pré-processamento da imagem consistiu em fazer a atenuação dos efeitos atmosférico por meio do método *Dark Object Subtraction* (DOS) proposto por (CHAVEZ, 1988) para a obtenção da reflectância ao nível do solo. A imagem foi recortada com o objetivo de diminuir o tempo de processamento e a quantidade de amostras necessárias no treinamento do classificador. Para isso foi utilizada como base a delimitação da bacia com uma faixa adicional de 500m, esta faixa foi utilizada para se evitar a geração de células com valores inválidos na borda da área de interesse após a classificação.

A seleção das amostras foi realizada por processo de crescimento de região. A identificação das áreas foi feita com base no conhecimento prévio da área de estudo. Atentou-se para que a coleta de amostras tivesse uma boa distribuição espacial em todas as classes. Foram utilizadas dez classes, água, área impermeabilizada por ocupação urbana, lavoura anual, lavoura perene, pastagem, silvicultura, solo exposto, vegetação

nativa Cerrado (cerrado *stricto sensu* ou cerrado típico e cerradão), vegetação nativa mata mesofítica (encosta e galeria) e vegetação nativa campos úmidos.

A classificação da imagem foi feita pelo algoritmo da máxima verossimilhança. Este classificador utiliza-se da probabilidade que o pixel possui de pertencer a uma determinada classe (MENESES; ALMEIDA, 2012). Ainda segundo esses autores, a eficiência deste se dá por utilizar as classes de treinamento como forma de distribuir os pixels pelas classes na imagem classificada e determinar o centro de cada classe.

Para a determinação dos HSGs, utilizou-se como base as informações contidas no mapa de classes de solo elaborado por UFV et al. (2010) na escala de 1:600.00. A classificação dos HSGs foi feita de acordo com o proposto por Sartori, Genovez, e Lombardi Neto (2005b). Esses autores adaptaram os HSGs para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). O HSGs são divididos em quatro grupos (SCS, 1989): A, caracterizado por solos com baixo potencial de escoamento; o B, solos com potencial de escoamento moderado; C, solos com potencial de escoamento moderadamente alto; D, solos com alto potencial de escoamento. A descrição detalhada dos HSGs e os solos que neles estão agrupados estão demonstrados no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação hidrológica dos solos para as condições brasileiras.

HSG	CARACTERÍSTICAS	SOLOS
A	- Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); - Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; - Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); - Solos de textura média; - Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; - Solos bem drenados ou excessivamente drenados; - Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; - A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média,	- LATOSSOLO AMARELO - LATOSSOLO VERMELHO AMARELO - LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; - LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura

HSG	CARACTERÍSTICAS	SOLOS
	argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.	média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	- Solos profundos (100 a 200 cm); - Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; - Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; - Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; - Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macro- porosidade em todo o perfil; - Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; - A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.	- LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; - LATOSSOLO BRUNO; - NITOSSSOLO VERMELHO; - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.
C	- Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); - Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; - São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; - Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); - A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.	- ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; - CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas

HSG	CARACTERÍSTICAS	SOLOS
		semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); - ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	- Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; - Solos rasos (prof. < 50 cm); - Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; - Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); - Solos orgânicos.	- NEOSSOLO LITÓLICO; - ORGANOSSOLO; - GLEISSOLO; - CHERNOSSOLO; - PLANOSSOLO; - VERTISSOLO; - ALISSOLO; - LUVISSOLO; - PLINTOSSOLO; - SOLOS DE MANGUE; - AFLORAMENTOS DE ROCHA; - Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; - ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Adaptado de Sartori, Genovez e Lombardi Neto (2005b).

Após a geração dos *rasters* de uso e cobertura do solo e HSGs, foi criado o do número da curva do escoamento superficial (CN) que é a relação entre os dois primeiros. A tabela de atribuição do CN foi adaptada conforme os usos e cobertura encontrados na área de estudo, conforme é apresentado na Tabela 6. As áreas de cultura anual e solo exposto foram agrupadas, uma vez que a área está temporariamente sem cultivo até a próxima

safra. Optou-se assim por usar a classe solo exposto apenas para diminuir a confusão do algoritmo de classificação.

Tabela 6. Número da Curva do Escoamento superficial (CN) em relação às classes de cobertura e uso do solo e HSG.

Classe	HSGs			
	A	B	C	D
Anual/Exposto	67	77	83	87
Cerrado	56	75	86	91
Úmida	30	58	71	78
Mata	36	60	70	76
Silvicultura	25	55	70	77
Urbano	77	85	90	92
Pastagem	25	59	75	83

Fonte: Adaptado e traduzido de SCS (1989).

Os dados de precipitação foram obtidos a partir da página *Climate Forecast System Reanalysis* (URL3). Para fazer o cálculo do escoamento foram utilizados os dados de um período de 35 anos, 1979 a 2013, de cinco estações meteorológicas localizadas na bacia e em seu entorno. Para determinar a área de influência das estações foram criados polígonos de Voronoi. Os polígonos de Voronoi são os polígonos mínimos formados por pontos, sendo que o polígono relativo a cada ponto possui uma área independente e apenas os limites se intersectam (SHEWHART et al., 1992).

Após a coleta dos dados foi calculada a média de precipitação e escolheu-se o ano considerado de precipitação normal, aquele cuja precipitação média encontra-se em um intervalo de mais ou menos 20% da precipitação normal. O ano considerado normal foi 1990.

Para o cálculo do escoamento superficial e do coeficiente de escoamento foram montadas planilhas considerando os CNs encontrados na área de influência de cada estação. Nessas planilhas foram incluídas as precipitações em mm para cada dia e as equações propostas pelo método SCS, como se segue. Primeiro foi calculada a precipitação acumula (P, em mm), que é a soma das precipitações anteriores com a do dia. Para calcular a relação entre

P , a infiltração, e o escoamento superficial acumulado (Q , em mm) foi utilizada a Equação 7 (TUCCI, 2005):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} \text{ para } P > I_a \quad (7)$$

Onde I_a representam as perdas iniciais em mm e S é o armazenamento do solo em mm.

Segundo este autor, adota-se o I_a como sendo 20% da capacidade de armazenamento do solo, ou seja $I_a = 0,2S$. Isto resulta na Equação 8.

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \text{ válida para } P > 0,2S \quad (8)$$

Quando $P < I_a$ (ou $P < 0,2S$), $Q = 0$.

O valor de S foi determinado em relação ao CN , obtido pela relação entre cobertura e uso do solo e HSG (Tabela 5). O cálculo de S foi feito de acordo com a Equação 9.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (9)$$

O método SCS considera diferentes condições de umidade antecedente (AMC), no entanto adotou-se a condição média como proposto por Sartori, Genovez e Lombardi Neto (2005a). Estes afirmam que, dessa forma os resultados apresentados são considerados satisfatórios.

Após o cálculo do escoamento, foi obtido o coeficiente de escoamento, que é a razão entre o escoamento acumulado e a precipitação acumulada para o ano normal. Para transformar esta informação em dado espacial, foi gerada uma camada vetorial com o cruzamento de dados entre CN e área de influência das estações. Esta camada foi unida à tabela de coeficiente de escoamento para cada valor de CN na região de influência de cada estação meteorológica. Por fim, foi gerado o *raster* de coeficiente de escoamento.

3.2.4 Ponderação dos critérios e subcritérios pela AHP

A AHP foi aplicada após a avaliação par a par dos critérios e subcritérios por seis especialistas, dois engenheiros civis, dois agrônomos e dois geógrafos, voluntários desta pesquisa. Esta avaliação foi feita de acordo com a escala de comparação da AHP mostrada na Tabela 1 (Seção 2.1.1) (SAATY, 1990) organizada em um questionário relacionando as características relativas de cada critério e seus subníveis. Foi requerido que os especialistas informassem de forma anônima o grau relativo de importância entre cada um dos fatores analisados. Isso foi realizado indicando valores de 1 a 9 a cada par comparado.

Após a avaliação foram montadas as matrizes par a par para os critérios e subcritérios, conforme mostrado nas Tabela 7 e Tabela 8. Nestas, os critérios da coluna foram avaliados em relação aos critérios da linha.

Tabela 7. Matriz de comparação par a par dos critérios.

Crítérios	Declividade (D)	Densidade de drenagem (DD)	Coefficiente de escoamento (CQ)
Declividade (D)	1	$\frac{D}{DD}$	$\frac{D}{CQ}$
Densidade de drenagem (DD)	$1/\left(\frac{D}{DD}\right)$	1	$\frac{DD}{CQ}$
Coefficiente de escoamento (CQ)	$1/\left(\frac{D}{CQ}\right)$	$1/\left(\frac{DD}{CQ}\right)$	1
ΣColunas	ΣD	ΣDD	ΣCQ

Fonte: Autor.

Tabela 8. Matriz de comparação par a par dos subcritérios.

Subcritérios	Baixa (b)	Moderada (m)	Alta (a)	Muito alta (ma)
Baixa (b)	1	$\frac{b}{m}$	$\frac{b}{a}$	$\frac{b}{ma}$
Moderada (m)	$1/\left(\frac{b}{m}\right)$	1	$\frac{m}{a}$	$\frac{m}{ma}$
Alta (a)	$1/\left(\frac{b}{a}\right)$	$1/\left(\frac{m}{a}\right)$	1	$\frac{a}{ma}$
Muito alta (ma)	$1/\left(\frac{b}{ma}\right)$	$1/\left(\frac{m}{ma}\right)$	$1/\left(\frac{a}{ma}\right)$	1
ΣColunas	Σb	Σm	Σa	Σma

Fonte: Autor.

Após a elaboração das matrizes par a par, foi feita a ponderação dos pesos para os critérios e subcritérios. Nesta ponderação a avaliação para cada critério foi dividida pela soma dos critérios de sua coluna. Por fim, os valores de cada linha da tabela de ponderação foram somados e divididos pelo número total de critérios. Isto resultou no Peso ponderado de cada um dos critérios. A verificação dos cálculos é dada pela soma dos pesos que deve ser igual a 1. Após a ponderação das avaliações feitas pelos seis especialistas, foram calculadas as médias dos três critérios e dos quatro subcritérios. Após a ponderação foi calculado o CR e separaram-se as ponderações entre aquelas com CR abaixo de 20% e aquelas com CR acima de 20%.

3.2.5 Combinação dos pesos dos critérios com RNA

Após a determinação dos pesos ponderados para os critérios e subcritérios pelos seis especialistas, estes pesos foram utilizados para alimentar diversas configurações de RNA. As RNAs foram criadas e aplicadas na linguagem R utilizando a biblioteca *neuralnet*. A arquitetura escolhida foi a *Feed-forward backpropagation* uma vez que o feedback da *backpropagation* faz com que as saídas voltem para ajustar os pesos iniciais, resultando assim na minimização dos erros (HAGAN et al., 1996). Dentro desta arquitetura foram utilizadas duas funções de ativação: Logística e Tangente Hiperbólica. Além disto variou-se a saída entre linear e da função de ativação, Tabela 9.

Tabela 9. Funções de ativação, saída e sigla.

Função de ativação	Saída	Sigla
Tangente Hiperbólica	Função de ativação	T
	Linear	TLN
Logística	Função de ativação	L
	Linear	LLN

Fonte: Autor.

As RNAs referentes aos critérios e subcritérios foram elaboradas com três e quatro neurônios de entrada e de saída, respectivamente. Os neurônios de entrada se referiam às ponderações feitas por cada um dos especialistas e os de saída aos critérios e subcritérios combinados. Com o intuito de se verificar qual a configuração mais adequada para a RNA, foram utilizadas diferentes estruturas de redes variando o número de camadas ocultas e o número de neurônios em cada camada com quatro, três, duas e uma camadas ocultas. Foi seguido o proposto por de Castro(1998), que o número de camadas ocultas não sejam maior que o número de neurônios de entrada e menor que a quantidade de neurônios de saída. As configurações utilizadas são demonstradas na Tabela 10.

Tabela 10. Configuração das camadas ocultas das RNAs.

Camadas Ocultas	Neurônios por camada ocultas
1	2
	3
	4
	5
2	32
	42
	43
	53
	53
3	54
	432
	542
4	543
	5432

Fonte: Autor.

Para avaliar a eficiência do CR na avaliação da AHP e a interferência do parâmetro de treinamento utilizaram-se a Média Gera (MG) e a das poderações com CR abaixo de 20% (M20).

3.2.6 Cálculo do potencial de RWH

As camadas referentes à declividade do terreno, densidade da malha de drenagem e coeficiente de escoamento superficial, foram reclassificadas de acordo com os valores atribuídos para os subcritérios. Utilizando-se a álgebra de mapas e o Índice de Potencial de RWH (IPRWH), mostrado na Equação 10, proposto por Singh, Jha e Chowdary (2017), foram gerados os *rasters* de Potencial de RWH.

$$IPRWH = P_D * P_{SD} + P_{DD} * P_{SDD} + P_{CQ} * P_{SCQ} \quad (10)$$

Onde: P_D , refere-se ao peso da declividade; P_{DD} , refere-se ao peso da densidade de drenagem; P_{CQ} , refere-se ao peso do coeficiente de escoamento; P_{SD} , refere-se à camada reclassificada com os pesos dos subcritérios da declividade; P_{SDD} , refere-se à camada reclassificada com os pesos dos subcritérios da densidade de drenagem; P_{SCQ} , refere-se à camada reclassificada com os pesos dos subcritérios do coeficiente de escoamento.

4 RESULTADOS

4.1 CRITÉRIOS

Os critérios utilizados para a AHP foram: declividade, densidade de drenagem e coeficiente de escoamento. Abaixo é discutida a distribuição desses critérios na área de estudo.

4.1.1. Declividade

A área de estudo é formada, em sua grande maioria, por áreas planas. Áreas com declividades média, alta e muito alta, somadas equivalem a menos de 5% da área da bacia, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11. Declividade.

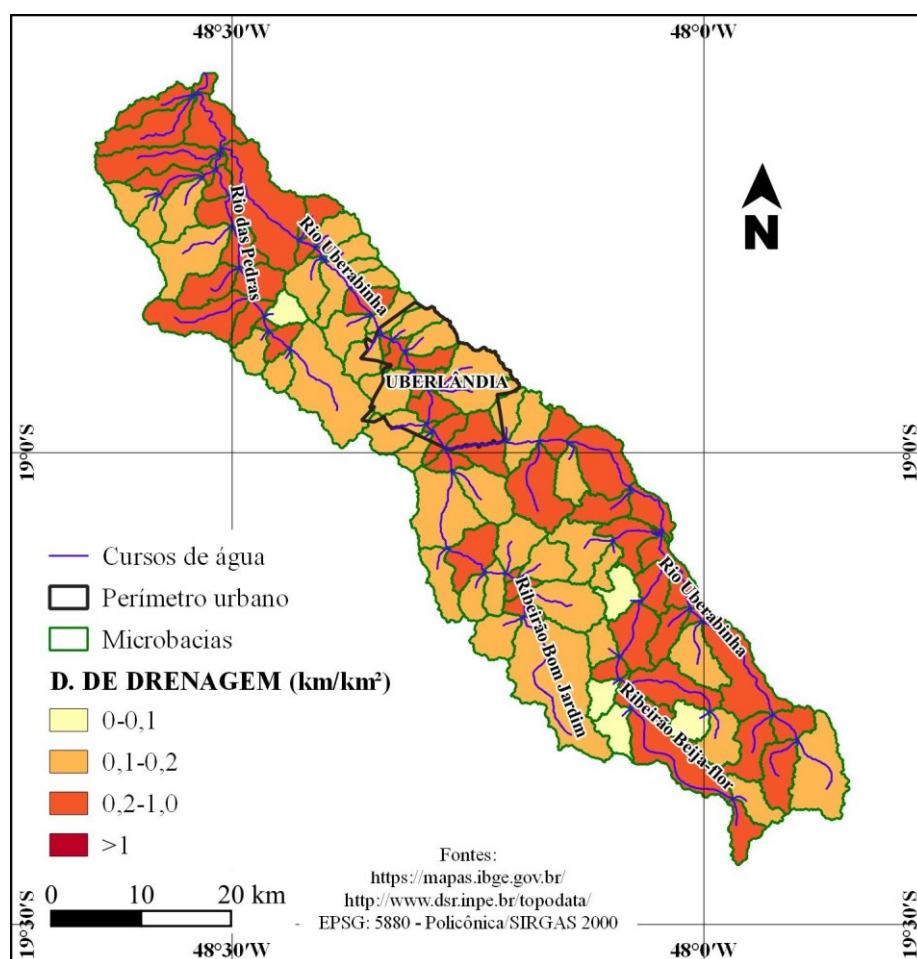
Classe	Declividade (%)	Área (km²)	Área(%)
Baixa	<8,7	2082,53	96,43
Moderada	8,7-17,4	66,80	3,09
Alta	17,4-26,1	9,76	0,45
Muito alta	>26,1	0,62	0,03

Fonte: Autor.

A distribuição das classes de declividade apresenta duas situações. O alto da bacia e as áreas adjacentes às nascentes dos cursos principais são predominante formadas por áreas de baixa declividade. As áreas mais íngremes estão localizadas na parte baixa da bacia e nos vales dos cursos principais. Esta situação pode ser observada na Figura 8.

As microbacias com densidade moderada de drenagem estão espalhadas por toda a bacia, já as com densidade moderada concentram-se próximas aos cursos de água principais. Isto pode ser observado na Figura 9.

FIGURA 9 - Figura do mapa de densidade de drenagem.



Fonte: Autor.

4.1.3. Coeficiente de escoamento

O coeficiente de escoamento é a relação entre a quantidade de água que é absorvida pelo solo e aquela que escoam superficialmente. Para a conversão dos dados de precipitação em escoamento superficial foi utilizado o método SCS. Este utiliza, além da precipitação, o uso e cobertura do solo, e os grupos hidrológicos do solo.

A ocupação predominante da bacia do Rio Uberabinha é composta, em sua maioria, por lavoura anual e pastagem, mais de 60% da área, como pode ser observado na Tabela 13. As vegetações nativas, cerrado, mata e campos úmidos, ocupam aproximadamente 25% da área.

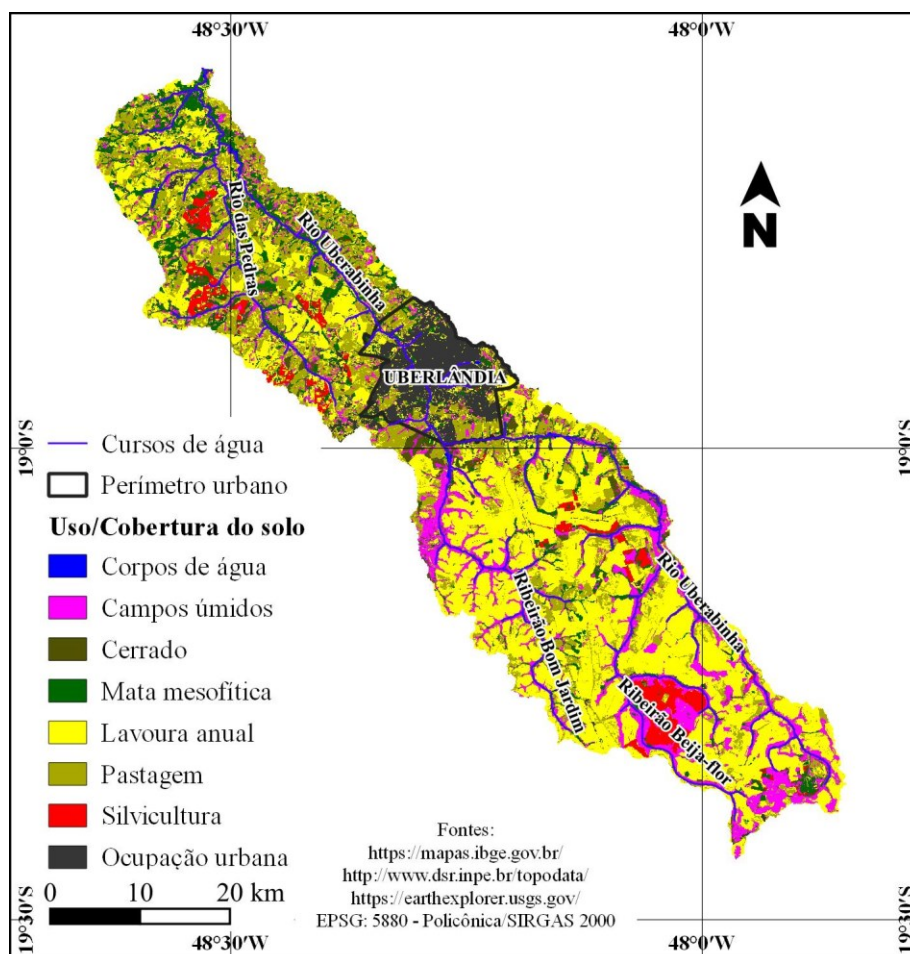
Tabela 13. Cobertura e uso do solo.

Cobertura/Uso	Área (km²)	Área(%)
Laboura anual	889,93	41,20
Vegetação nativa Cerrado	42,34	1,96
Vegetação nativa Campos úmidos	280,35	12,98
Vegetação nativa Mata mesofítica	240,81	11,15
Corpos de água	6,65	0,31
Silvicultura	82,49	3,82
Ocupação urbana	146,62	6,79
Pastagem	470,84	21,80

Fonte: Autor.

O alto da bacia é predominante ocupado por lavouras anuais, como observado na Figura 10, isto se deve em grande parte ao relevo plano. Nesta área também são encontradas faixas de campos úmidos, principalmente nas áreas de nascente e próximo aos cursos principais. À jusante da cidade de Uberlândia são encontradas, principalmente, áreas de lavoura e pastagem, a maior heterogeneidade de ocupações se dá pelo relevo mais acidentado.

FIGURA 10 - Figura do mapa de cobertura e uso do solo.



Fonte: Autor.

Para a definição dos HSGs foi necessário obter a informação sobre os solos encontrados na área de estudo. A nomenclatura das classes de solo adotada foi a proposta por UFV et al. (2010). Os solos predominantes da área de estudo são o Latossolo Vermelho distrófico típico A moderado textura média (LVd1) e textura argilosa (LVd2), como é mostrado na Tabela 14. O primeiro é característico de área de floresta subcaducifólia e o segundo de cerrado. Ambos são encontrados em áreas planas e suavemente onduladas.

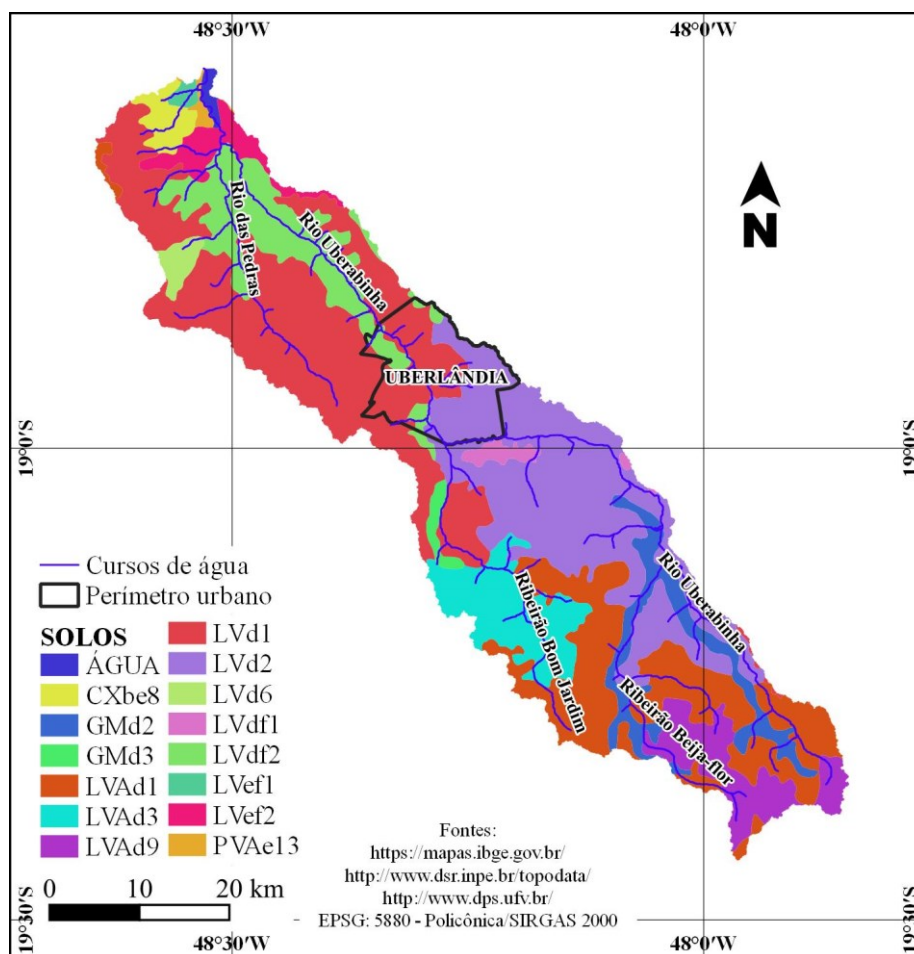
Tabela 14. Classes de solo.

Solo	Área (km²)	Área(%)
CXbe8	32,32	1,50
GMd2	110,10	5,10
GMd3	15,54	0,72
LVAd1	330,53	15,30
LVAd3	142,63	6,60
LVAd9	117,56	5,44
LVd1	609,83	28,23
LVd2	488,75	22,63
LVd6	20,16	0,93
LVdf1	17,82	0,83
LVdf2	203,34	9,41
LVef1	7,45	0,35
LVef2	49,96	2,31
PVAe13	6,41	0,30
ÁGUA	7,65	0,35

Fonte: Autor.

O alto da bacia é formado por LVAd9, LVAd1 e GMd2, como pode ser observado na Figura 11. Na parte central predomina o LVd2 próximo ao Rio Uberabinha e o LVAd3 próximo ao Ribeirão Bom Jardim. À jusante da cidade de Uberlândia são encontrados prioritariamente o LVdf2 e o LVd1.

FIGURA 11 - Figura do mapa de classes dos solos.



Fonte: Autor.

Na área de estudo são encontrados os quatro HSGs, no entanto quase 60% da área é formada por solos do grupo B (Tabela 15). Solos do grupo C e corpos de água, somados, representam menos de 1% da área.

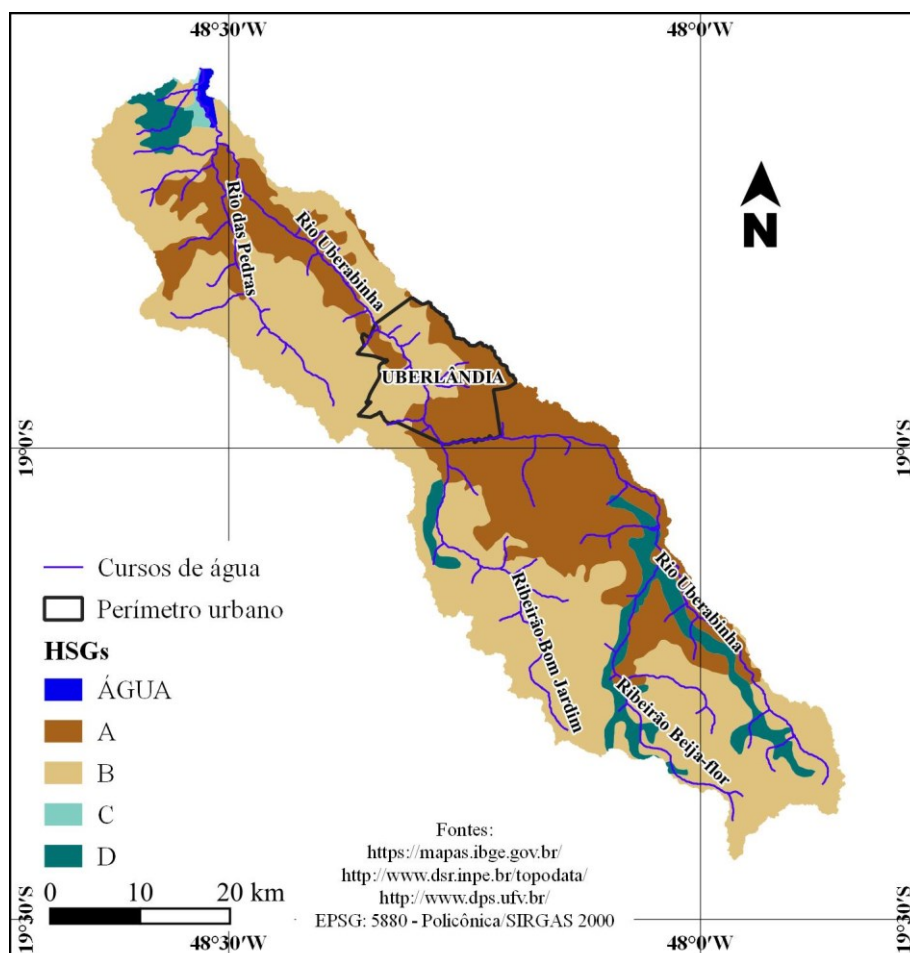
Tabela 15. HSGs.

HSG	Área (km ²)	Área(%)
A	730,06	33,80
B	1257,97	58,24
C	6,41	0,30
D	157,95	7,31
Água	7,65	0,35

Fonte: Autor.

Os solos do grupo B são encontrados por toda a área da bacia (Figura 12). Já os do grupo A encontram-se próximos aos cursos principais e nos interflúvios entre estes, tanto na parte intermediária, quanto na parte baixa da bacia.

FIGURA 12 - Figura do mapa de HSG.



Fonte: Autor.

A partir da união entre os dados de cobertura e uso do solo e HSGs foram encontrados os CNs do método SCS. A área é predominada por áreas consideradas de média a baixa infiltração, mais de 70% da área apresenta CNs entre 55 e 85 (Tabela 16).

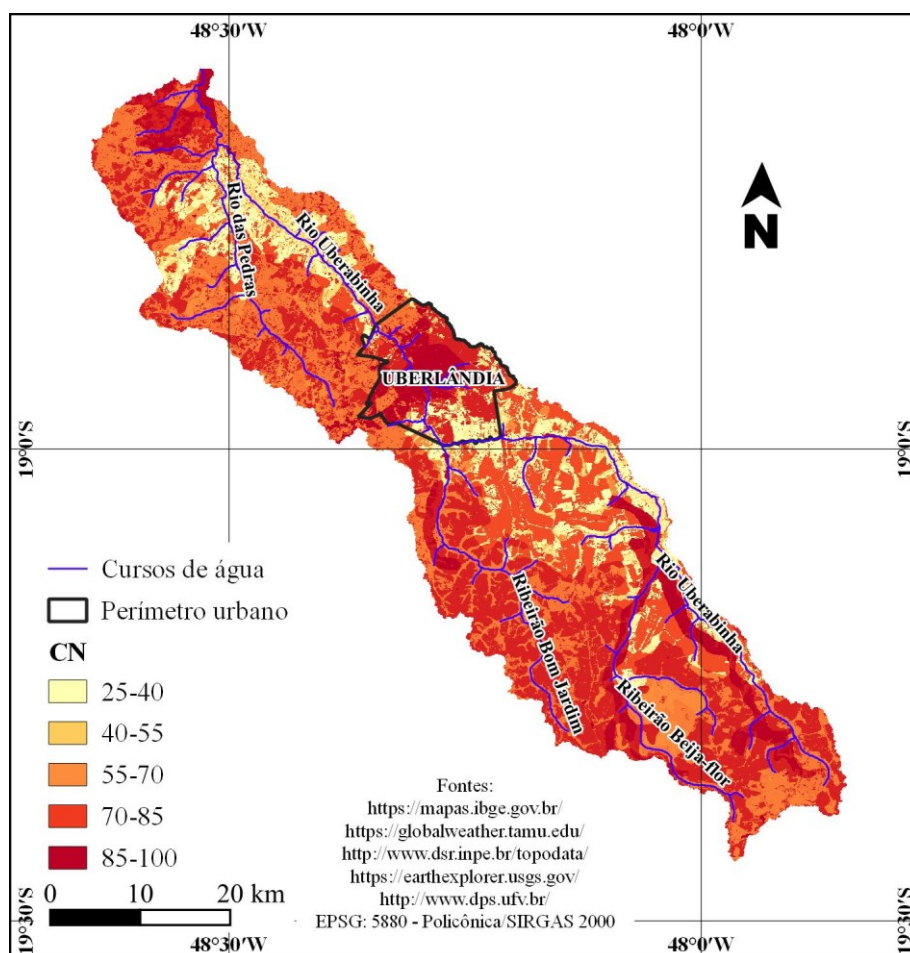
Tabela 16. CN.

CN	Área (km ²)	Área(%)
25-40	357,33	16,25
40-55	58,16	2,65
55-70	895,96	40,75
70-85	796,60	36,23
85-100	90,48	4,12

Fonte: Autor.

As áreas com CN entre 25 e 40 estão concentradas próximo aos cursos principais, assim como as áreas com CN entre 85 e 100 (Figura 13). As faixas intermediárias de CN estão espalhadas pelo restante da bacia.

FIGURA 13 - Figura do mapa de CN.



Fonte: Autor.

Os dados de precipitação utilizados para calcular o escoamento superficial foram coletados de cinco estações climatológicas (Tabela 17). Foram analisados os dados diários para o período entre 1979 e 2013. A partir desses dados selecionou-se o ano considerado normal, cuja a média está dentro de um intervalo de mais ou menos 2% da média geral.

Tabela 17. Área de influência das estações climatológicas.

Estação	Área (km²)	Área(%)
186-484	206,34	9,55
189-481	269,00	12,45
189-484	673,07	31,16
192-478	185,02	8,57
192-481	826,61	38,27

Fonte - Autor

As estações que abrangem as maiores áreas e as áreas centrais são a 189-484 e a 192-481 (Figura 14).

FIGURA 14 - Figura do mapa de área de influência das estações meteorológicas.



Fonte: Autor.

A área da bacia do rio Uberabinha é predominantemente formada por regiões com coeficientes de escoamento alto e muito alto, aproximadamente 80% da área (Tabela 18).

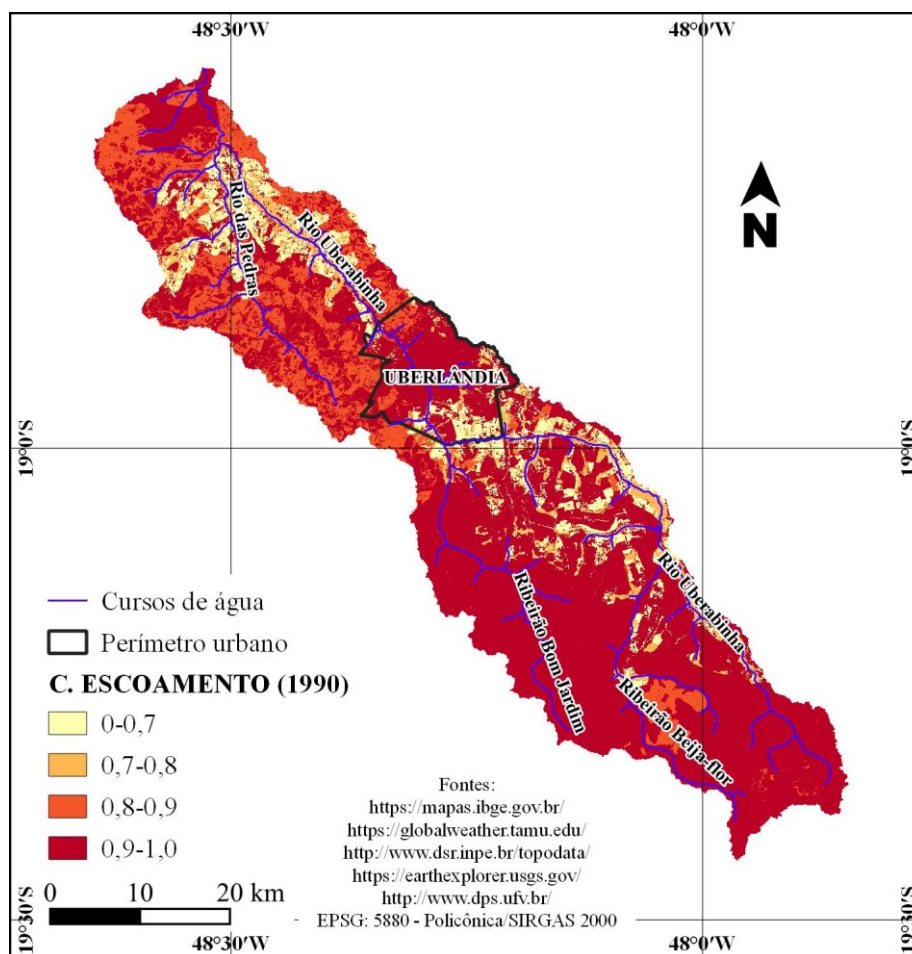
Tabela 18. Coeficiente de Escoamento.

Classe	C. Escoamento	Área (km ²)	Área(%)
Baixa	<0,7	199,06	9,22
Moderada	0,7-0,8	155,03	7,18
Alta	0,8-0,9	332,90	15,41
Muito alta	>0,9	1473,01	68,20

Fonte - Autor

As regiões com coeficiente baixo e moderado estão localizadas próximas aos cursos dos cursos principais (Figura 15).

FIGURA 15 - Figura do mapa de coeficiente de escoamento.

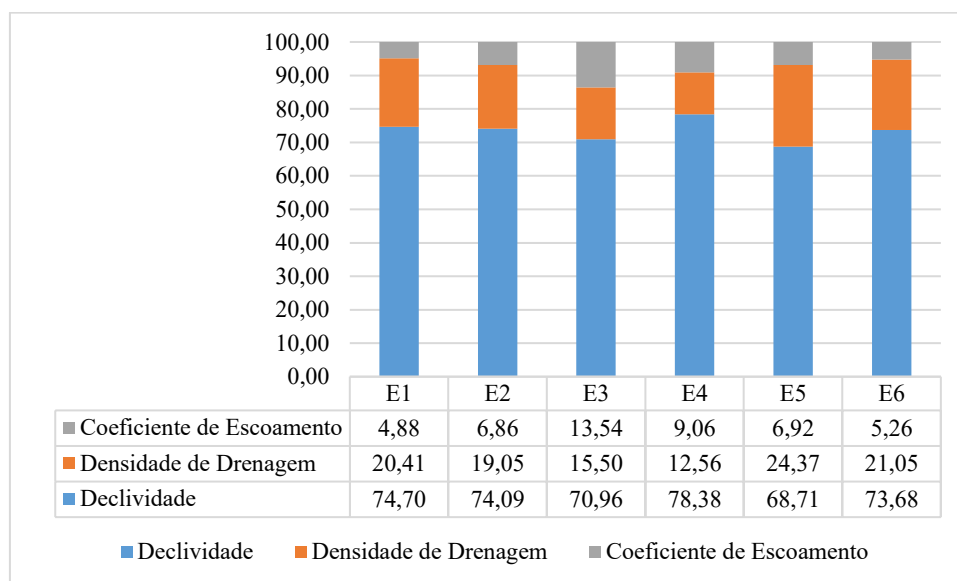


Fonte: Autor.

4.2 PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS

O Questionário dos especialistas (Apêndice A) foi respondido por seis voluntários de três áreas distintas, sendo: dois agrônomos (Especialistas 1 e 2); dois engenheiros civis (Especialistas 3 e 4); dois geógrafos (Especialistas 5 e 6). Após esta avaliação foi pareada pela importância relativa os critérios de subcritérios. No Gráfico 1 é possível observar que a ordem dos critérios não é alterada, mas há alteração na magnitude dos pesos.

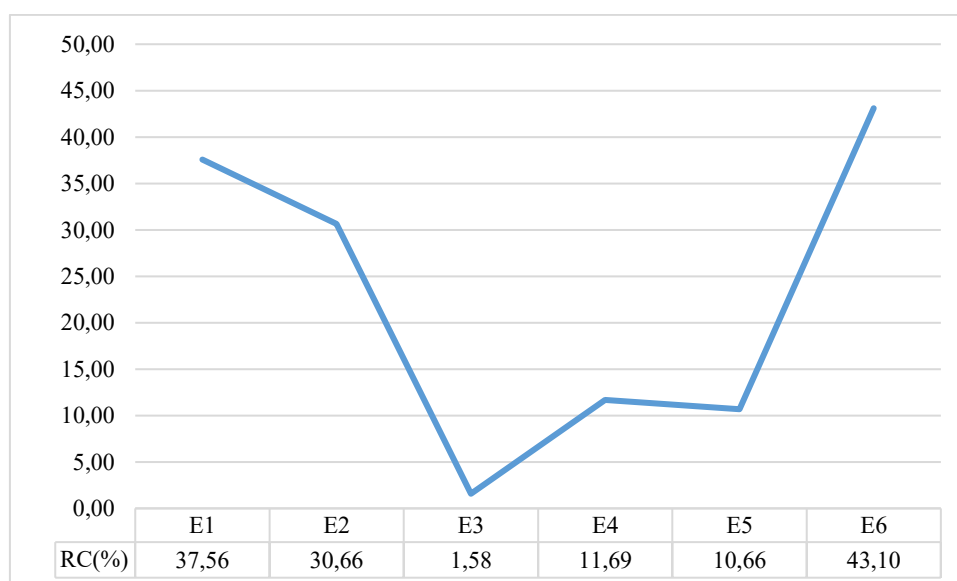
GRÁFICO 1 - Pesos das AHPs dos especialistas



Fonte: Autor.

Após elaborar as matrizes par a par com os seis especialistas foram calculados o CR, segundo (SAATY, 1990), Gráfico 2 no é possível observar que os especialistas 1, 2 e 6 possuem CR acima de 20% enquanto os especialistas 3, 4 e 5 possuem CR abaixo de 20%.

GRÁFICO 2 - CR das AHPs seis especialistas

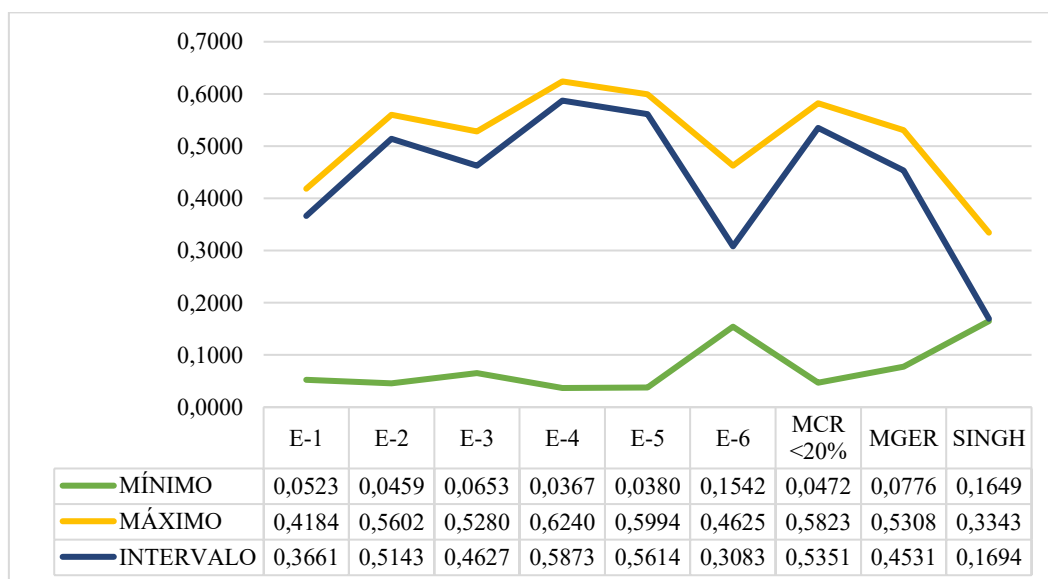


Fonte: Autor.

4.3 COMBINAÇÃO DOS PESOS DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS COM RNA

A análise comparativa da performance das ponderações utilizadas no cálculo do PRWH foi feita a partir das estatísticas das imagens. Ao comparar as imagens geradas a partir das ponderações feitas pelos especialistas, das médias dessas ponderações (todos os especialista e especialistas cujas ponderações tiveram um CR abaixo de 20%) e a feita por (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017), como apresentado no Gráfico 3. Nesta análise foi possível observar que os valores obtidos a partir das ponderações do Especialista 6 e de (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017) são as que mais se diferenciam das outras. Por outro lado, é possível observar que os valores obtidos a partir dos pesos do Especialista 2, cujo CR foi acima de 20%, são bem próximos àqueles obtidos a partir da média dos especialistas com CR abaixo de 20%. Este resultado aponta que o CR como forma de avaliação de coerência da matriz de especialistas não é isento dos impactos causados por influência de ponderações muito dispersas. Com isso, o CR pode perder força por falta de consistência no grupo de especialistas que ponderam na AHP.

GRÁFICO 3 - Comportamento dos valores mínimos, máximos e intervalos de PRWH gerados com base nos pesos dos especialistas, das médias e de Singh, Jha e Chowdary (2017)

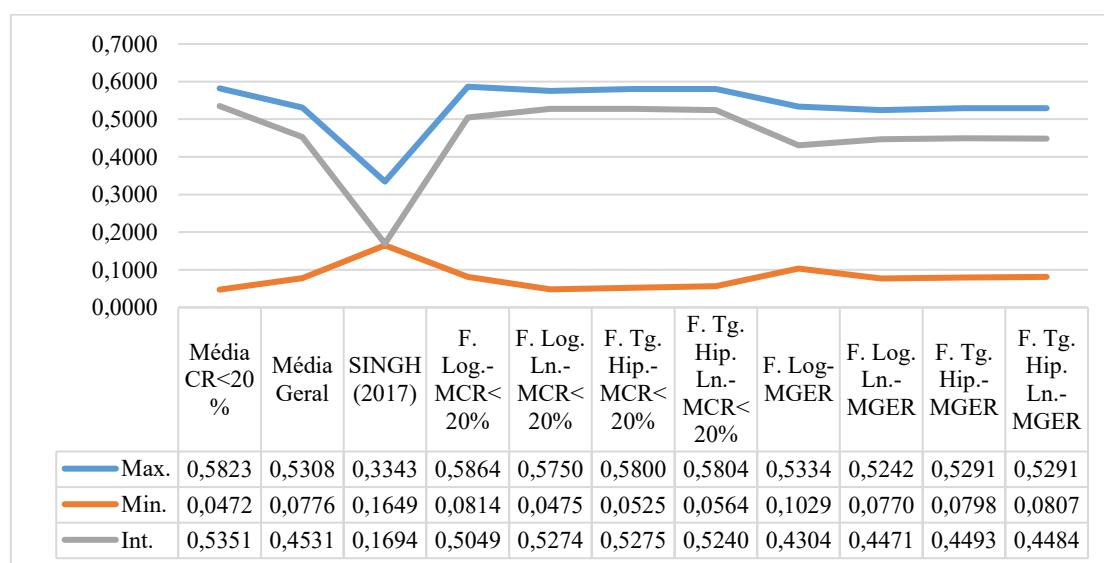


Fonte: Autor.

Ao efetuar a comparação entre as imagens produzidas a partir das médias das AHPs (todos os especialista e especialistas cujas ponderações tiveram um CR abaixo de 20%),

dos pesos de (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017) e das RNAs, como mostrado no Gráfico 4. No caso das RNAs foram utilizados os valores médios observados nas imagens produzidas a partir das ponderações de cada função de ativação e média utilizada como alvo no treinamento. Nesta observou-se, novamente, a discrepância entre os dados produzidos a partir da ponderação de (SINGH; JHA; CHOWDARY, 2017) e os outros dados. Ainda é possível observar que os dados produzidos a partir dos pesos obtidos das RNAs acompanham a média que foi utilizada com alvo no treinamento. Também é possível observar que as imagens produzidas com pesos oriundos de RNAs com função Logarítmica se diferenciam das outras. Por fim foi possível observar que entre os dados produzidos a partir de pesos obtidos de RNAs com funções de ativação logarítmica com saída linear, tangente hiperbólica e tangente hiperbólica com saída linear houve estabilização dependendo da média utilizada como alvo da RNA. Este resultado indica que a média dos grupos amostrais pode ser utilizada na maior parte das redes por ter uma aparente estabilidade nos valores das ponderações das camadas de saída das redes de forma independente das funções. A exceção são as funções logarítmicas que não tiveram desempenho semelhante às demais.

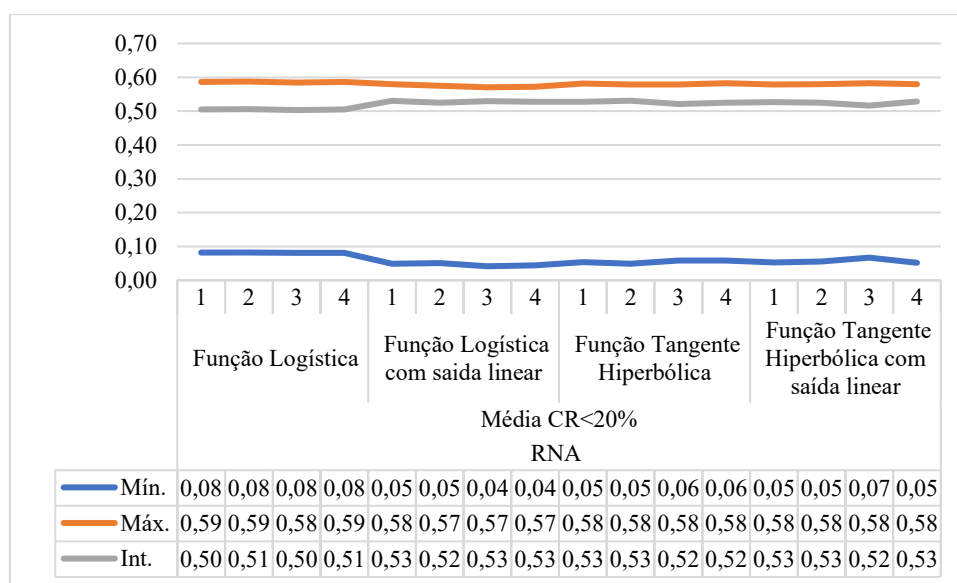
GRÁFICO 4 - Comportamento dos valores mínimos, máximos e intervalos de PRWH gerados com base nos pesos das médias, de Singh, Jha e Chowdary (2017) e das RNAs agrupadas por função de ativação e média utilizada como alvo



Fonte: Autor.

A comparação entre as imagens que foram elaboradas a partir dos pesos gerados pelas redes que utilizaram como alvo a média dos especialistas cujas AHPs tiveram CR abaixo de 20%, como apresentado no Gráfico 5 foi feita levando em conta a função de ativação e o número de camadas ocultas. Nesta análise, novamente foi possível observar que as imagens produzidas a partir de pesos oriundos das redes que utilizaram a função de ativação logarítmica se diferenciaram em relação às que utilizaram as outras funções de ativação. Foi possível observar ainda o número de camadas ocultas pouco interferiu no resultado de PRWH.

GRÁFICO 5 - Comportamento dos valores mínimos, máximos e intervalos de PRWH gerados com base nos pesos das RNAs que utilizaram com alvo as médias dos especialistas com CR abaixo de 20% agrupadas por função de ativação e número de camada oculta

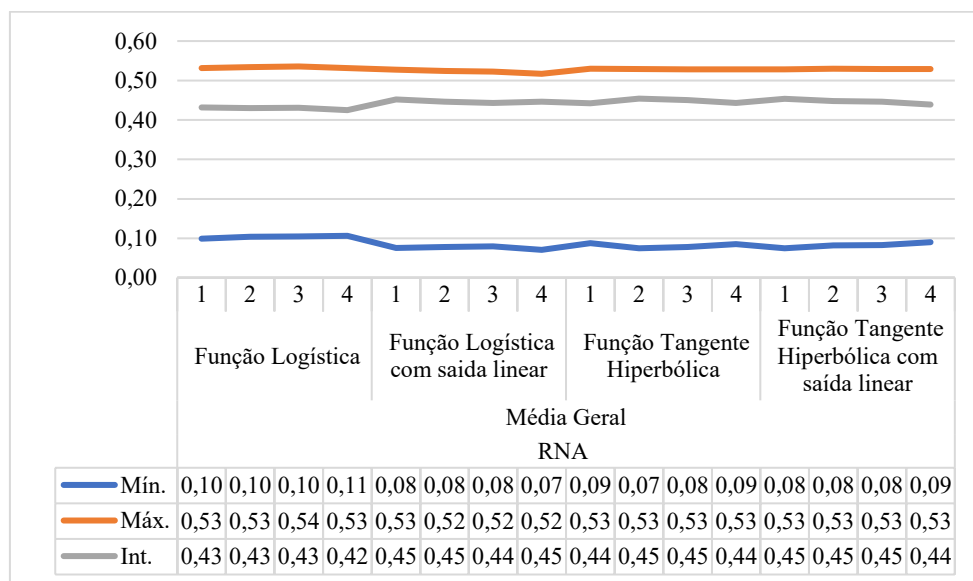


Fonte: Autor.

Ao analisar as imagens que foram elaboradas a partir dos pesos gerados pelas redes que utilizaram como alvo a média de todos os especialistas, como apresentado no Gráfico 6, foi possível observar um resultado semelhante ao visto nas redes que utilizaram a média dos especialistas com CR abaixo de 20%, pois observou-se que as imagens produzidas a partir de pesos oriundos das redes que utilizaram a função de ativação logarítmica se diferenciaram em relação às que utilizaram as outras funções de ativação. Além de que

foi possível observar que o número de camadas ocultas pouco interferiu no resultado de PRWH.

GRÁFICO 6 - Comportamento dos valores mínimos, máximos e intervalos de PRWH gerados com base nos pesos das RNAs que utilizaram com alvo as médias de todos os especialistas agrupadas por função de ativação e número de camada oculta

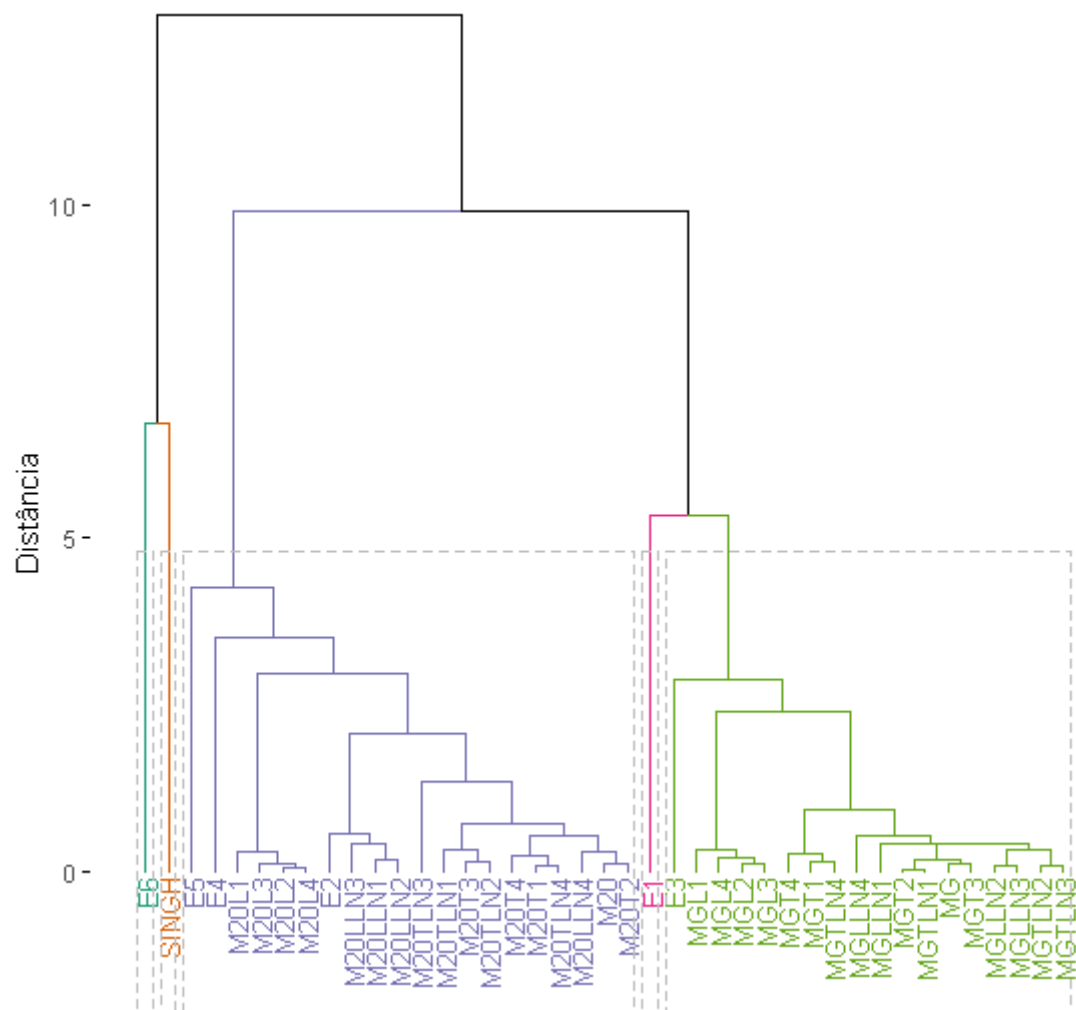


Fonte: Autor.

Por fim compararam-se as imagens geradas a dos pesos dos especialistas, das médias, de Singh, Jha e Chowdary (2017) e as médias das RNAs utilizando a análise de agrupamento hierárquica, Figura 16. Foram calculadas médias das estatísticas das imagens com base na média utilizada como alvo no treinamento da rede, função de ativação e número de camadas ocultas. Os dados foram separados em cinco grupos por similaridade utilizando a distância euclidiana. As estatísticas utilizadas foram: valor mínimo, valor máximo, intervalo de valores, média e desvio padrão. Os dados do Especialista 6, denominados de E6, e de Singh, Jha e Chowdary (2017), denominados de SINGH, foram os que mais discrepam do restante, formando os grupos 1 e 2 respectivamente. Os dados originados das redes que utilizaram a média dos especialistas com CR abaixo de 20% , denominados de M20, formaram o grupo 3. Dentro deste, mas com uma distância relativamente grande dos outros dados, encontram-se os dados oriundos dos especialistas 4 e 5, denominados de E4 e E5, ambos tiveram CR abaixo de 20%. Ainda dentro do Grupo 3 formou-se um pequeno grupo contendo os dados oriundos de redes que utilizaram a média dos

especialistas com CR abaixo de 20% e função de ativação logística, denominadas de M20L. Por fim, dentro do Grupo 3 foram agrupados dados oriundos do especialista 2, denominado de E2, cujo CR foi maior que 20% , oriundos de redes que utilizam como alvo a média dos especialistas com CR abaixo de 20% com função logística com saída linear, M20LLN, função tangente hiperbólica, denominados de M20T e tangente hiperbólica com saída linear, M20TLN e os oriundos da média dos especialistas com CR abaixo de 20%. O Grupo 4 foi formado pelos dados oriundos das ponderações do Especialista 1. O Grupo 5 agrupou os dados originados das redes que utilizaram a média geral, MG. Os dados oriundos das ponderações dos especialistas 3, E3 cujo CR foi abaixo de 20%, foram agrupados dentro do Grupo 5, mas com uma distância relativamente grande dos outros dados. Os dados oriundos de redes que utilizaram a média geral e a função de ativação logística, denominados de MGL formaram um pequeno grupo dentro do Grupo 5. Este grupo ainda contemplou dados oriundos de redes que utilizam como alvo a média geral com função logarítmica com saída linear, denominados de MGLLN, função tangente hiperbólica, MGT e tangente hiperbólica com saída linear, denominados de MGTLN e os oriundos da média dos especialistas com CR abaixo de 20%.

FIGURA 16 - Agrupamento hierárquico das imagens de PRWH.



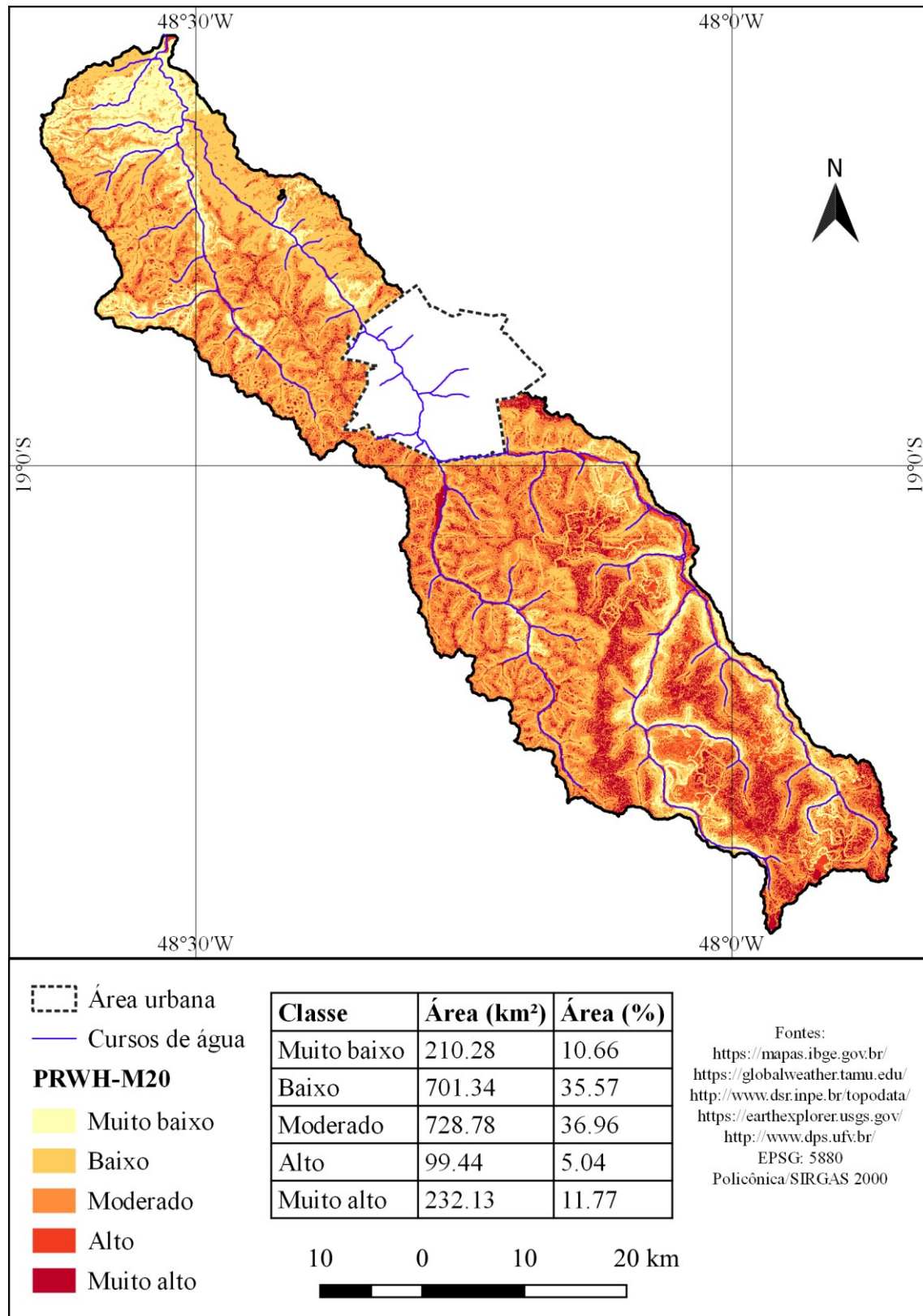
Fonte: Autor.

A Figura 16 apresenta que as imagens formadas com base nas ponderações dos especialistas E6, E1 e SINGH são únicas, portanto podem ser tratadas como exceção por apresentarem características que as diferem das demais imagens agrupadas. As demais imagens foram separadas em dois grupos com base no critério de distância, um com a MG e as redes que a utilizaram como parâmetro de treinamento e outro com a M20 e as redes que a utilizaram como treinamento. Esse resultado indica que as variações das ponderações para cada grupo são próximas internamente ao grupo e, portanto, os resultados quando aplicada aos mapas sofrem pequenas variações. Por outro lado, a distância entre grupos é um fator importante para a seleção das redes e pode levar a resultados mais significantes. Para avaliar essa conclusão foram gerados quatro mapas considerando uma imagem referente à média e outra referente às redes que utilizaram esta

média em cada grupo. Optou-se por analisar as imagens obtidas a partir dos pesos das médias M20 e MG e as redes M20TLN1 e MGLLN4.

As duas primeiras imagens analisadas fazem parte do Grupo 3, estas são a da média dos especialistas com CR abaixo de 20%, denominada de M20, e a média das redes que utilizaram esta média, a função Tangente Hiperbólica com saída linear e uma camada oculta, denominada de M20TLN1. A imagem de PRWH M20, Figura 17, apresenta uma predominância de áreas com PRWH moderado e baixo. Já as áreas com PRWH Alto são minoria. As áreas de maior interesse, ou seja com PRWH muito alto, representem mais de 10% da área total.

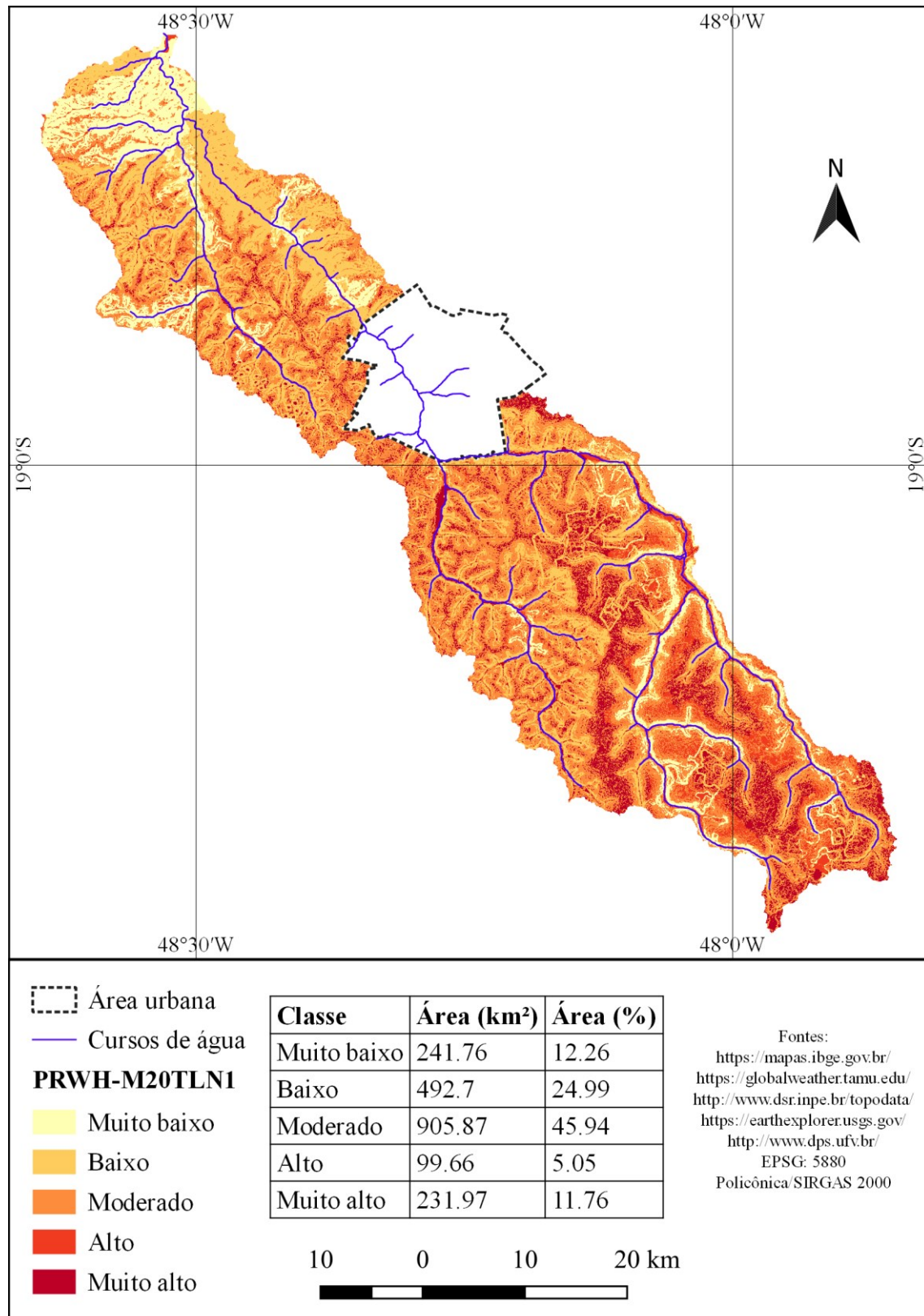
FIGURA 17 - Classes de PRWH conforme os pesos da rede M20.



Fonte: Autor.

Ao analisar a Figura 18, referente à imagem de PRWH M20TLN1, que foi criada a partir da média dos pesos das redes que utilizaram como alvo a média dos especialistas com CR abaixo de 20%, função de ativação Tangente Hiperbólica com saída linear e uma camada oculta com um neurônio, observou-se uma predominância de áreas classificadas com PRWH Moderado e uma minoria de áreas classificadas como PRWH alto. Assim como na imagem M20, as áreas com PRWH muito alto representaram pouco mais de 10% do total.

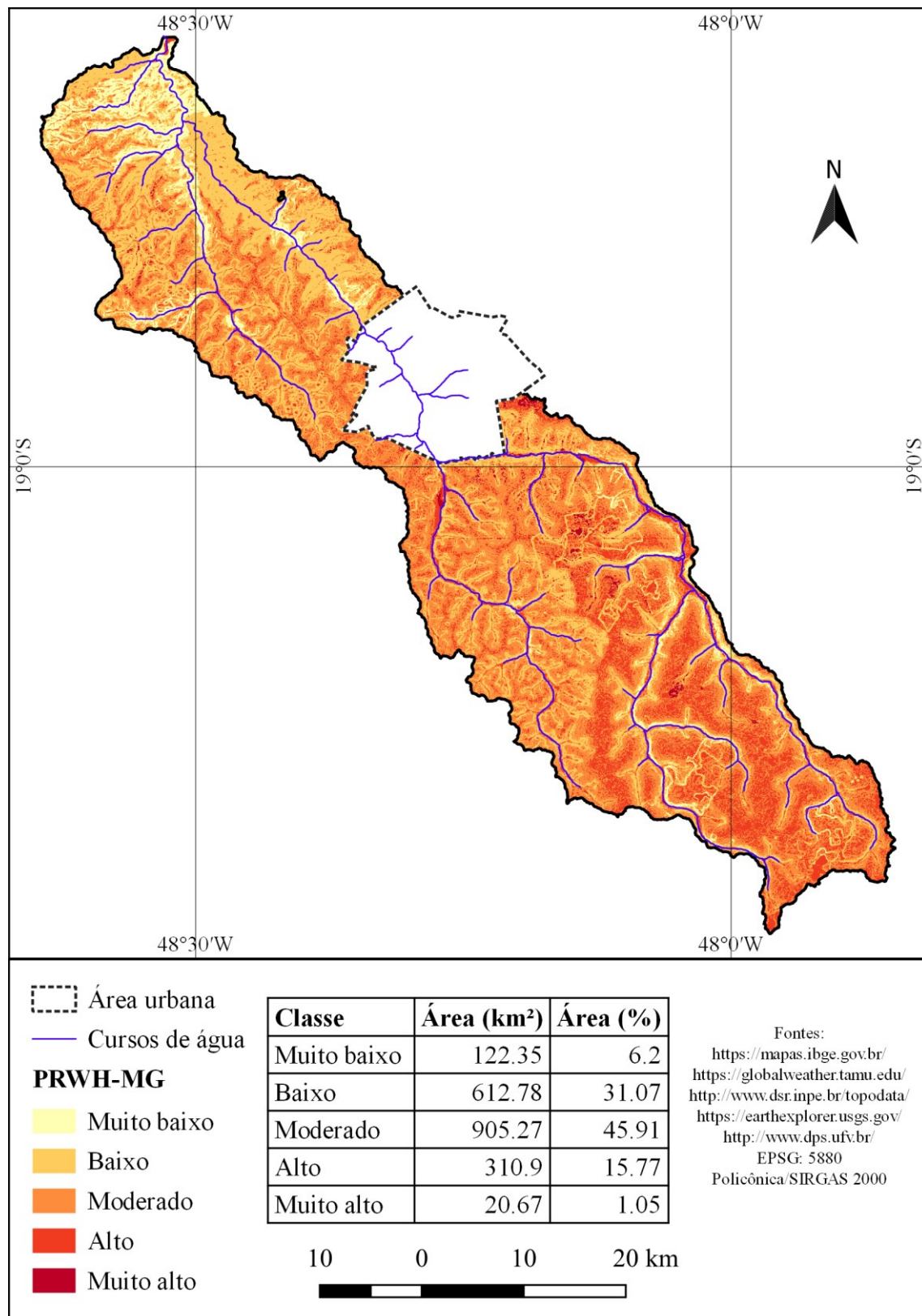
FIGURA 18 - Classes de PRWH conforme os pesos da rede M20TLN1.



Fonte: Autor.

As outras duas imagens estão contidas no Grupo 3 e se referem àquelas formadas a partir da média geral, MG e da rede treinada usando com referência esta média, a função Logística com saída linear e a quatro camadas ocultas, MGLLN4. Ao analisar a imagem PRWH-MG, Figura 19, foi possível observar uma classe muito baixa abrangente e a classe muito alta, a de maior interesse para o estudo, com grande restrição em áreas.

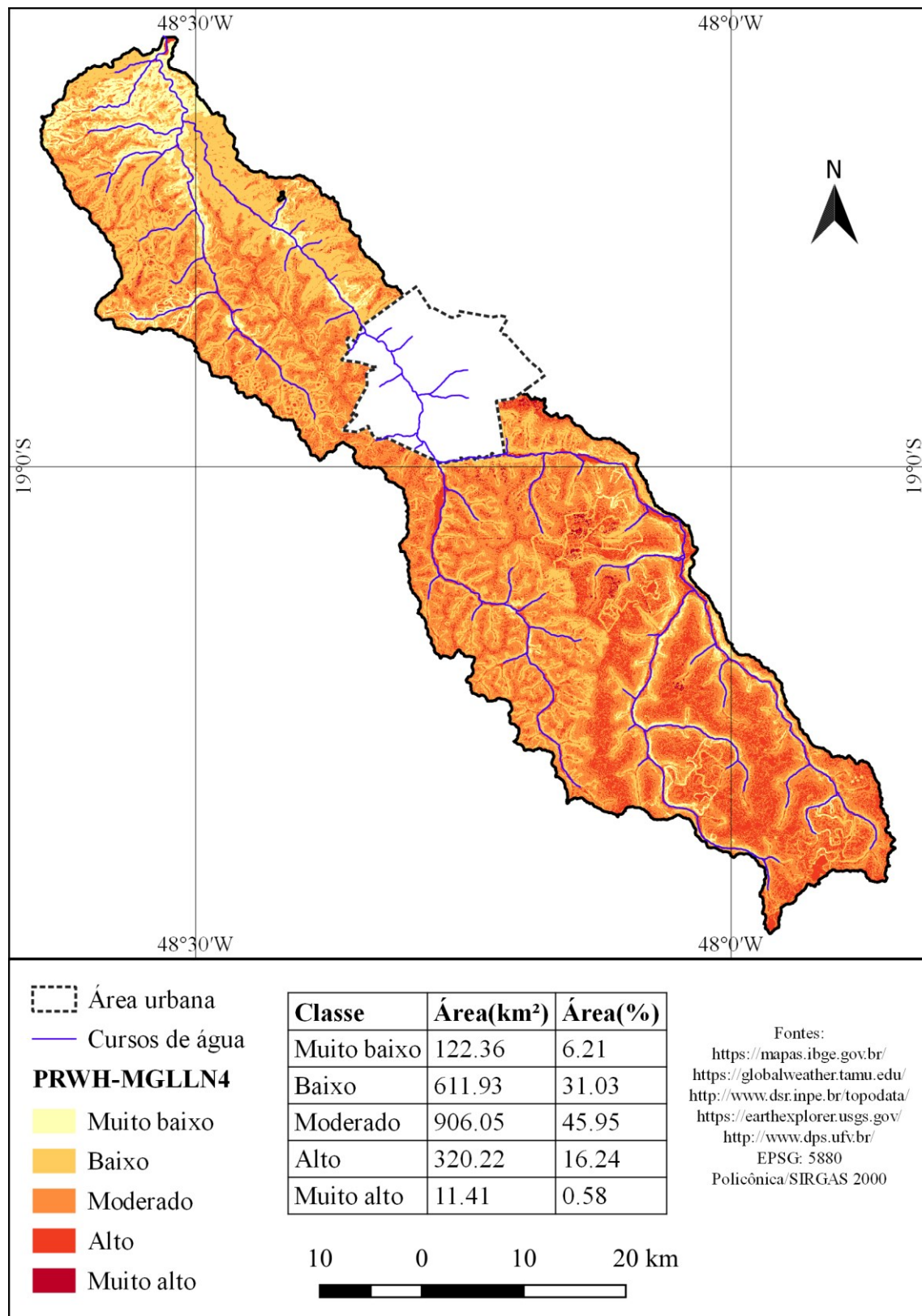
FIGURA 19 - Classes de PRWH conforme os pesos da rede MG.



Fonte: Autor.

A distribuição de áreas da imagem PRWH-MGLLN4, Figura 20, se assemelham da PRWH-MG uma vez que as áreas com PRWH Moderado são predominante e a classe com a menor área foi a com PRWH Muito alto.

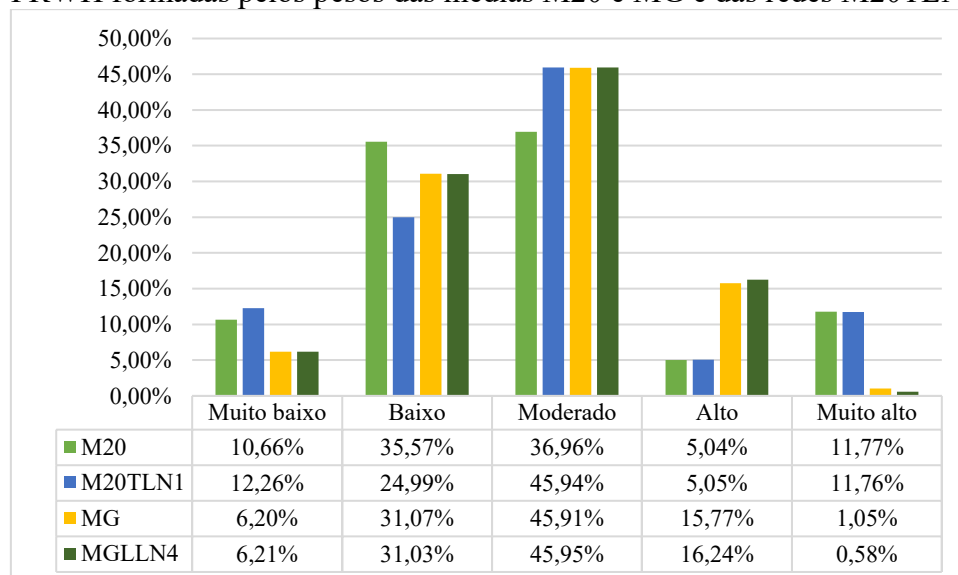
FIGURA 20 - Classes de PRWH conforme os pesos da rede MGLLN4.



Fonte: Autor.

Ao analisar a distribuição de área das quatro imagens, Gráfico 7, é possível notar um pareamento entre a média e a rede que utilizou essa média como parâmetro de treinamento. Portanto observa-se, principalmente quando do uso da Função Logística com saída linear, que o resultado da rede se aproxima muito do dado utilizado como alvo no treinamento. Com isso a escolha deste dado é de fundamental importância. Ainda é possível observar que tanto a média geral, quanto a rede gerada utilizando-a com parâmetro de treinamento produziram classes com PRWH muito alto mais restritivas. Com isso se reduz o esforço de prospecção de áreas para a implantação de estruturas de PRWH.

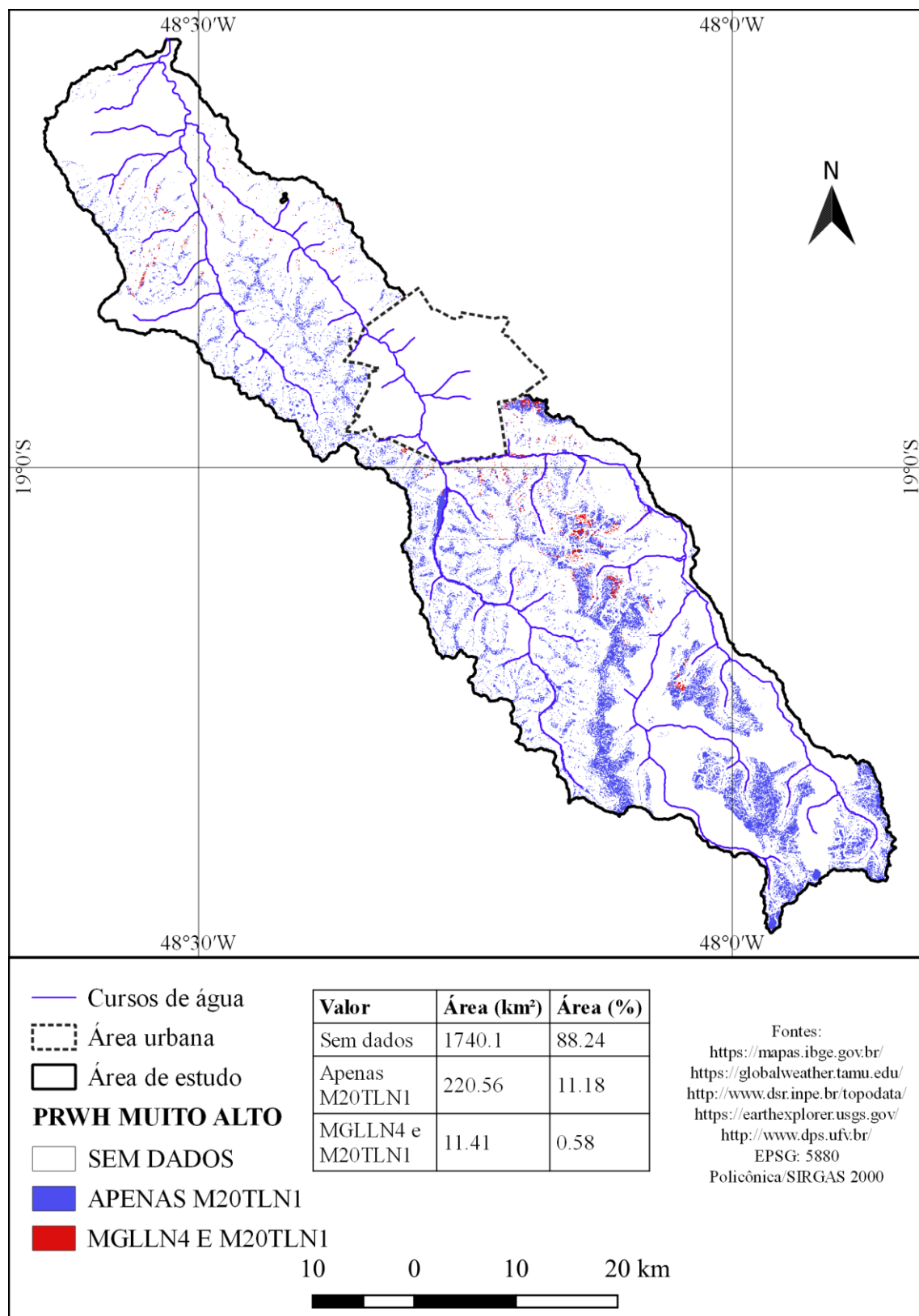
GRÁFICO 7 - Comparação das áreas das classes em porcentagem das imagens de PRWH formadas pelos pesos das médias M20 e MG e das redes M20TLN1 e MGLLN4



Fonte: Autor.

Por fim observou-se que há sobreposição entre as áreas classificadas com PRWH Muito alto entre as duas imagens geradas a partir de redes, Figura 21. As áreas classificadas com PRWH Muito Alto na imagem M20TLN1 ocupam 11,76% da área total, já as produzidas a partir dos pesos gerados a partir da rede MGLLN4 apenas 0,56%. As áreas indicadas por essa última coincidem com as produzidas pela rede M20TLN1, portanto as indicadas exclusivamente pela MGLLN4 são 11,18% da área total. Isto reforça o fato de que a diferença entre as imagens no que diz respeito à classe muito alta é que a M20TLN1 é mais abrangente e a MGLLN4 mais restritiva.

FIGURA 21 - Comparação entre as áreas de PRWH Muito Alto das imagens criadas a partir dos pesos das redes M20TLN1 e MGLLN4.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Os fatores mais usados na literatura para identificar áreas com potencial de implantação de estruturas de RWH são: declividade, densidade de drenagem e coeficiente de escoamento. Esses fatores se demonstraram igualmente relevantes na região do Cerrado Mineiro. No entanto, ao se utilizar o protocolo AHP para ponderar esses fatores observaram-se diferenças nos julgamentos dos especialistas. Mostrando assim que a AHP é suscetível à subjetividade destes.

Quando se observa o CR, que é tido como um parâmetro de avaliação da AHP, constatou-se que mesmo entre especialistas com CR próximos obtiveram-se pesos distintos. Indicando assim que o CR sozinho não seria um fator adequado para avaliar a subjetividade da AHP. A média daqueles especialistas com CR abaixo de 20% comparada com a média de todos os especialistas produziram resultados distintos.

Tendo isso em vista estas médias foram utilizadas como parâmetro de treinamento das RNAs com o intuito de combinar os resultados dos especialistas. Nesse contexto, foram treinadas 112 redes com a arquitetura feed-forward backpropagation. As funções de ativação utilizadas foram a Logística, e Tangente Hiperbólica. As saídas variaram entre linear e da função de ativação. A quantidade de camada oculta variou entre uma e quatro, variando-se a quantidade de neurônios por camada.

Após a comparação dessas redes observou que os resultados das redes que utilizara a Função Logística apresentaram uma pequena distância dos demais. A quantidade e a configuração das camadas ocultas não apresentaram uma interferência importante no resultado. O fator que mais interferiu no resultado foi a média utilizada como parâmetro alvo do treinamento.

Tendo isso em vista compararam-se os resultados das redes criadas com cada uma das médias e se concluiu que as redes geradas a partir da média geral geraram resultados mais restritivos e portanto se demonstraram adequados para diminuir a quantidade de áreas a

serem estudadas para a implantação das estruturas de PRWH. Por outro lado os resultados das redes que utilizara a média dos especialistas com CR abaixo de 20.

Para análises futuras, propõem-se que sejam elaborados modelos hidrológicos para analisar o comportamento hídrico da região. Propõem-se ainda que seja feita análise da demanda e da disponibilidade de áreas, para se certificar dos melhores locais para a implantação das estruturas. A análise geológica e hidrogeológica das áreas com maior potencial é necessária para que se identifique se o local é mais adequado para recarga de água subterrânea ou implantação de tanques para utilização da água. Propõem-se ainda que sejam analisadas outras arquiteturas de RNAs, assim como diferentes parâmetros de treinamento. Por fim, propõem-se que a metodologia utilizada neste estudo seja comparada com metodologias que utilizem outras formas de ponderação de critérios e que outros critérios sejam analisados.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, A. 129: Artificial Neural Networks. In: Handbook of Measuring System Design. [s.l: s.n.].

AKTER, A.; AHMED, S. Potentiality of rainwater harvesting for an urban community in Bangladesh. Journal of Hydrology, v. 528, p. 84–93, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.017>

BISHOP, C. M. Neural Networks for Pattern Recognition. Clarendon Press, p. 482, 1995. <https://doi.org/10.2307/2965437>

BURKE, L. I.; DAMANY, P. The guilt net for the traveling salesman problem. v. 19, n. 314, p. 255–265, 1992. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(92\)90047-9](https://doi.org/10.1016/0305-0548(92)90047-9)

BURSTEIN, F.; HOLSAPPLE, C. W. Handbook on Decision Support Systems 1. n. January, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48713-5>

CÂMARA, G. et al. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica. Inpe, p. 205, 1996.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, v. 24, n. 3, p. 459–479, 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)

DE CASTRO, E. G. Reconhecimento de padrões em tomada de decisão utilizando redes neurais artificiais. [s.l.] EPUSP, 1998.

EMBRAPA, E. B. D. P. A. Sistema brasileiro de classificação de solos. [s.l: s.n.].

GARCÍA, N.; GÁMEZ, M.; ALFARO, E. ANN+GIS: An automated system for property valuation. *Neurocomputing*, v. 71, n. 4–6, p. 733–742, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.07.031>

GHAYOUMIAN, J. et al. Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 30, n. 2, p. 364–374, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.11.002>

GHOLAMI, V.; SEBGHATI, M.; YOUSEFI, Z. Integration of artificial neural network and geographic information system applications in simulating groundwater quality. *Environmental Health Engineering and Management*, v. 3, n. 4, p. 173–182, 2016.
<https://doi.org/10.15171/EHEM.2016.17>

GUPTA, K. K.; DEELSTRA, J.; SHARMA, K. D. Estimation of water harvesting potential for a semiarid area using GIS and remote sensing. *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems (Proceedings of the Rabat Symposium S3)*. IAHS Publ, v. No. 242, n. 242, p. 53–62, 1997.

HAGAN, M. T. et al. *Neural Network Design*. 2nd. ed. Boston: [s.n.].

HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. [s.l.] Bookman Editora, 2001.

HO, C. I.; LIN, M. DER; LO, S. L. Use of a GIS-based hybrid artificial neural network to prioritize the order of pipe replacement in a water distribution network. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 166, n. 1–4, p. 177–189, 2010.
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-0994-6>

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Nihon Ringakkai Shi/Journal of the Japanese Forestry Society*, v. 37, n. 6, p. 257–262, 1955.

KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; MAGESH, N. S. Evaluation of multiple environmental factors for site-specific groundwater recharge structures in the Vaigai River upper basin, Tamil Nadu, India, using GIS-based weighted overlay analysis. *Environmental Earth Sciences*, v. 74, n. 5, p. 4355–4380, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4384-9>

LANG, S.; BLASCHKE, T. *Análise da paisagem com SIG*. [s.l.] Oficina de Textos, 2009.

LEE, S. et al. Regional groundwater productivity potential mapping using a geographic information system (GIS) based artificial neural network model. *Hydrogeology Journal*, v. 20, n. 8, p. 1511–1527, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0894-7>

LEE, S.; PARK, I.; CHOI, J. K. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network. *Environmental Management*, v. 49, n. 2, p. 347–358, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9766-5>

LONGLEY, P. A. et al. *Sistemas e ciência da informação geográfica*. [s.l.] Bookman Editora, 2009.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 20, n. 7, p. 703–726, 2006. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>

MALCZEWSKI, J. Multiple criteria decision analysis and geographic information systems. In: *Trends in multiple criteria decision analysis*. [s.l.] Springer, 2010. p. 369–395. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5904-1_13

MBILINYI, B. P. et al. GIS-based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 32, n. 15–18, p. 1074–1081, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.014>

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. DE. Introdução ao processamento de imagem de sensoriamento remoto. Cnpq/Unb, p. 266, 2012.

MWENGE KAHINDA, J. et al. A GIS-based decision support system for rainwater harvesting (RHADESS). *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 34, n. 13–16, p. 767–775, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.06.011>

MWENGE KAHINDA, J. MARC et al. Developing suitability maps for rainwater harvesting in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 33, n. 8–13, p. 788–799, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.06.047>

NISHIYAMA, L. Procedimentos de mapeamento geotécnico como base para análise e avaliações ambientais do meio físico em escala 1: 100.000 aplicação no município de Uberlândia-MG. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, L. A. DE. RELAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO E DEMANDA HÍDRICA NA BACIA DO RIO UBERABINHA, ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL
Relationship between production and demand water in the Uberabinha watershed, State of Minas Gerais, Brazil. *Soc. & Nat.*, Uberlândia, v. 25, n. 1, p. 191–203, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000100015>

RAMAKRISHNAN, D.; BANDYOPADHYAY, A.; KUSUMA, K. N. SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science*, v. 118, n. 4, p. 355–368, 2009. <https://doi.org/10.1007/s12040-009-0034-5>

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005a. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p19-29>

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005b. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>

SCHMIDT, M. A. R.; BARBOSA, G. R. Use of artificial neural networks in initial ponderation of AHP techniques applied to analysis of watershed vulnerability . *Boletim de Ciencias Geodesicas*, v. 22, n. 3, p. 511–525, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000300029>

SCS. *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*. Washington DC, USA: Soil Conservation Service (SCS). US Department of Agriculture (USDA), 1989.

SHEWHART, W. A. et al. *Spatial tessellations: Concepts and applications of Voronoi diagrams*. [s.l: s.n.].

SINGH, J. P.; SINGH, D.; LITORIA, P. K. Selection of suitable sites for water harvesting structures in Soankhad watershed, Punjab using remote sensing and geographical information system (RS&GIS) approach- a case study. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 37, n. 1, p. 21–35, 2009. <https://doi.org/10.1007/s12524-009-0009-7>

SINGH, L. K.; JHA, M. K.; CHOWDARY, V. M. Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 1436–1456, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163>

STEINEL, A. et al. Spatial multi-criteria analysis for selecting potential sites for aquifer recharge via harvesting and infiltration of surface runoff in north Jordan. *Hydrogeology Journal*, v. 24, n. 7, p. 1753–1774, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1427-6>

TRANTAPHYLLOU, E.; MANN, S. H. Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications : Some Challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, v. 2, n. 1, p. 35–44, 1995.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. 2.ed. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

UFV et al. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida. Belo Horizonte, 2010.

XJUI, B. O. E. D. B. Rainwater harvesting: a lifeline for human well-being. *Water*, v. 41, p. 69, 2009.

URL1: Earth Explorer - <https://earthexplorer.usgs.gov/>

URL2: TOPODATA, Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil - <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>

URL3: Climate Forecast System Reanalysis - <https://globalweather.tamu.edu/>

APÊNDICE A – Questionário para especialistas

Especialista n°: _____

Especialidade: _____

Em uma bacia hidrográfica localizada no domínio morfoclimático do Cerrado qual a relação de importância, de acordo com a escala de importância apresentada na tabela abaixo, entre declividade do terreno, densidade de drenagem e coeficiente de escoamento superficial, para a escolha de áreas com potencial para coleta de água da chuva?

Utilize a tabela abaixo para expressar a intensidade de importância relativa:

Intensidade de importância	Definição
1	Importância igual
2	Importância extremamente fraca em relação ao outro
3	Fraca importância de um sobre o outro
4	Importância moderadamente fraca em relação ao outro
5	Importância forte ou essencial em relação ao outro
6	Importância muito forte em relação ao outro
7	Importância evidente em relação ao outro
8	Importância muito evidente em relação ao outro
9	Importância absoluta em relação ao outro

Parte I – Classes gerais

- 1- Qual a importância relativa da declividade do terreno em relação a:
 - a. Densidade de drenagem: (1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
 - b. Escoamento superficial: (1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)

- 2- Qual a importância relativa da densidade de drenagem em relação a:
 - a. Declividade do terreno: (1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
 - b. Escoamento superficial: (1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)

- 3- Qual a importância relativa do escoamento superficial em relação a:
 - a. Declividade do terreno: (1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
 - b. Densidade de drenagem: (1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)

Parte II – Subclasses

Tendo como referência a escala de importância apresentada anteriormente, como seriam avaliadas as **classes de declividade** entre si, em relação à importância na escolha de áreas com potencial para aproveitamento de água da chuva? Utilize a escala de 1 a 9:

	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
Baixa	1			
Moderada		1		
Alta			1	
Muito alta				1

Tendo como referência a escala de importância apresentada acima, como seriam avaliadas as classes de **densidade de drenagem** entre si, em relação à importância na escolha de áreas com potencial para aproveitamento de água da chuva? Utilize a escala de 1 a 9:

	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
Baixa	1			
Moderada		1		
Alta			1	
Muito alta				1

Tendo como referência a escala de importância apresentada acima, como seriam avaliadas as classes de **coeficiente de escoamento superficial** entre si, em relação à importância na escolha de áreas com potencial para aproveitamento de água da chuva? Utilize a escala de 1 a 9:

	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
Baixa	1			
Moderada		1		
Alta			1	
Muito alta				1