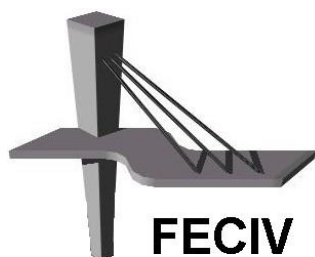


Dissertação de Mestrado

**Utilização das Redes Neurais Artificiais para
redução da subjetividade da Técnica AHP
Aplicado a Vulnerabilidade Ambiental: Estudo
de Caso do Córrego do Fundo, Carmo do
Paranaíba - MG**

Gustavo Rodrigues Barbosa

UBERLÂNDIA, 31/07/2015



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Gustavo Rodrigues Barbosa

**Utilização das Redes Neurais Artificiais para Redução
da Subjetividade da Técnica AHP Aplicado a
Vulnerabilidade Ambiental: Estudo de Caso do Córrego
do Fundo, Carmo do Paranaíba - MG**

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**.

Marcio Augusto Reolon Schmidt

31/07/2015

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

- B238u
2015 Barbosa, Gustavo Rodrigues.
 Utilização das redes neurais artificiais para redução da subjetividade da técnica AHP aplicado a vulnerabilidade ambiental: estudo de caso do Córrego do Fundo, Carmo do Paranaíba - MG / Gustavo Rodrigues Barbosa. - 2015.
 78 f. : il.
- Orientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
 Inclui bibliografia.
1. Engenharia Civil - Teses. 2. Inteligência artificial - Teses. 3. Bacias hidrográficas - Teses. 4. Carmo do Paranaíba (MG) - Recursos naturais - Teses. I. Schmidt, Marcio Augusto Reolon. II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



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



**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ATA Nº: 146/2015

CANDIDATO: Gustavo Rodrigues Barbosa

Nº. Matrícula: 11322ECV001

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

TÍTULO: "Utilização das redes neurais artificiais para redução da subjetividade do Método AHP:
Estudo de caso do Córrego do Fundo, Lagoa Formosa - MG"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

DATA DA DEFESA: 31 de julho de 2015

LOCAL: Sala de webconferência 03, bloco 5M.

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 09H15 às 11H49

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

☒ APROVADO

☐ REPROVADO

OBS: O aluno deverá proceder as correções indicadas pela banca

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: **Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof.ª Dr.ª Luciene Stamato Delazari – PPGCG/UFPR**

Membro interno: **Prof.ª Dr.ª Vanessa Cristina de Castilho – FECIV/UFU**

Uberlândia, 31 de julho de 2015.

Barbosa, R. G. Utilização das Redes Neurais Artificiais para redução da subjetividade do Método AHP Aplicado a Vulnerabilidade Ambiental: Estudo de Caso do Córrego do Fundo, Carmo do Paranaíba - MG 96 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

RESUMO

Diversos trabalhos têm aplicado a técnica de ponderação *Analytical Hierarchical Process* (AHP), criada por Saaty (1980), nas análises multicriteriais ligadas a gestão de recursos hídricos e ambientais. Dentre esses trabalhos destaca-se a análise de vulnerabilidade ambiental proposta por Ross (1994), que se tornou referência para diversos outros trabalhos no Brasil. O emprego da técnica AHP tem ganhado relevância em estudos ambientais devido a sua associação aos sistemas de informações geográficas, que permitem associar diversos graus de suscetibilidade das classes das variáveis de morfogênese e pedogênese em um mapa. O que não aparece na literatura é uma avaliação da influência da experiência e outras condicionantes humanas na ponderação inicial da aplicação da técnica e que podem incorrer em subjetividade no momento da análise. Por isso, esta pesquisa propõe a aplicação do método das Redes Neurais Artificiais (RNA) como forma de filtrar as ponderações indicadas por especialistas na aplicação da técnica AHP e minimizar a subjetividade do processo de análise. Nessa pesquisa os resultados da técnica AHP são utilizados com ponderação por Ross (1994), por especialistas locais através de questionários e com aplicação das RNA na determinação do mapa de áreas ambientalmente vulneráveis da bacia hidrográfica do córrego do Fundo, Carmo do Paranaíba, MG (Brasil). Os resultados apontam que a aplicabilidade das RNA's para redução da subjetividade dos dados obtidos com o método AHP, possui uma consistência relevante.

Palavras-chave: Vulnerabilidade Ambiental, Redes Neurais Artificiais, Bacia Hidrográfica

Barbosa, R. G. Use of Artificial Neural Networks to reduce the subjectivity of AHP Method Applied to Environmental Vulnerability: Case Study of Córrego do Fundo, Carmo do Parnaíba, MG 96 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2015.

ABSTRACT

Many researches have applied the Analytical Hierarchical Process (AHP) technique created by Saaty (1980), in the multicriterial analysis related to management of water and environmental resources. Among these works, highlight the vulnerability analysis proposed by Ross (1994) which became a reference for many other researchers in Brazil. The use of AHP technique has gained importance in environmental studies because of its association with geographic information systems to assign different degrees of susceptibility classes to morphogenesis and pedogenesis variables on a map. What is not appear in the literature is an assessment of the influence of experience and other human conditions in the initial consideration of the technical implementation and that may incur subjectivity in the analysis. Therefore, this research proposes to apply the method of artificial neural network (ANN) as a way to refine the weights indicated by experts in the application of AHP technique and minimize the subjectivity of the analysis process. In this research the AHP technique results are ponderations ass proposed by Ross (1994), by local experts through questionnaires and the application of ANN in determining the map of environmentally vulnerable areas of the watershed Córrego do Fundo, Carmo do Parnaíba, MG (Brasil). The results allow affirming applicability of RNA's to reduce the subjectivity of the data obtained with the AHP method has relevant consistency.

Keywords: Environmental vulnerability, Artificial Neural Networks, Watershed

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	Erro! Indicador não definido.
1.2 – Justificativa	4
1.3- Objetivo Geral	4
1.3- Objetivos Específicos	4
 CAPÍTULO 2	 6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Definições Gerais	6
2.2- Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	10
2.3- Métodos de Apoio a Tomada de Decisão	11
2.3.1- A Técnica AHP - Analytic Hierarchy Process	12
2.3.2- Redes Neurais Artificiais (RNA's)	17
 CAPÍTULO 3	 24
MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1- Área de Estudo	24
3.2. Procedimentos Metodológicos	25
3.2.1. Aquisição dos dados	28
a) Dados de declividade	28
b) Dados de Pedologia	30
c) Dados de Pluviosidade	31
d) Dados de Uso do Solo	32
3.3- Modelagem por AHP e RNA	34
3.3.1- Modelo de Vulnerabilidade com AHP de Ross baseado em Declividade	34
3.2.3- Elaboração Questionário	37
3.2.4- Redes Neurais Artificiais (RNA's)	37
3.2.5- Método Kruskal-Wallis	41

CAPÍTULO 4	43
RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1- Vulnerabilidade Ambiental – Ponderações AHP.....	44
4.2–Vulnerabilidade Ambiental – Ponderações Redes Neurais	46
4.2.1- Caso 1	46
4.2.2- Caso 2	54
4.2.3- Analise comparativa dos cenários	61
4.3- Comparativos entre resultados.....	70
 CAPÍTULO 5	 71
CONCLUSÕES	71
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 71
 APÊNDICE A	 76

FIGURAS E TABELAS

Figuras

Figura 1 - A Hierarquia do AHP.....	13
Figura 2 - A = Demonstração de Sistema Linear; B = Sistema não Linear	18
Figura 3 - Funcionamento Função Perceptrons	18
Figura 4 - Arquitetura de um “perceptron” de três camadas.	19
Figura 5 - Arquitetura do processo de feed-forward e backpropagation.	20
Figura 6 - Funções de Ativação	21
Figura 7 - Exemplo de função de sobreposição.....	23
Figura 8 - Localização da área de estudo	24
Figura 9 - Esquema de Apresentação dos Processos Metodológicos	27
Figura 10 - Imagem do Mapa de Declividade	29
Figura 11 - Imagem do Mapa de Pedológico	30
Figura 12 - Imagem do Mapa de Precipitação.....	32
Figura 13 - Imagem do Mapa de Uso do Solo.....	33
Figura 14 - Telas de Ferramenta NNTOOLS	39
Figura 15 - Estrutura geral da arquitetura da rede neural.....	41
Figura 16 - Imagem do Mapa de Vulnerabilidade Ambiental AHP da Bacia do Córrego do Fundo.....	45
Figura 17 - Percentual de Áreas Técnica AHP	45
Figura 18 - Interface do NNTOOLS (Matlab)	48
Figura 19 - Gráficos dos Coeficientes de Correlação A: Tangente Hiperbólica; B: Degrau C: Sigmoidal. Fonte: Autor (2015).....	51
Figura 20 - Imagem do Mapa de vulnerabilidade considerando as ponderações dos especialistas (Caso 1).....	53
Figura 21 - Gráfico de Percentual de Áreas (Caso 1)	54
Figura 23 - Imagem do Mapa de vulnerabilidade considerando as ponderações da RNA (Caso 2)	59
Figura 24 Gráfico de Percentual de Áreas (Caso 2)	60
Figura 25 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Muito Fraco”. .	61

Figura 26 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Muito Fraco”. ..62	62
Figura 27 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Fraco”63	63
Figura 28 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Fraco”64	64
Figura 29 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Médio”.65	65
Figura 30 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Médio”.66	66
Figura 31 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Forte”.67	67
Figura 32 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Forte”.68	68
Figura 33 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Muito Forte”. ...69	69
Figura 34 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Muito Forte”70	70
Figura 35 - Imagem do Mapa da Diferença de Áreas entre 1 = AHP, 2 = Caso 1 e 3 = Caso 272	72
Figura 36 – Gráfico da Comparação de Áreas Obtidas nas Comparações73	73

Tabela

Tabela 1 - Função da Intensidade do Processo.....8	8
Tabela 2 - Escala de comparação de Saaty (1977)14	14
Tabela 3 - Matriz de Comparação Pareada14	14
Tabela 4 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n.15	15
Tabela 5 - Cálculo de Aw a Partir do Produto das Matrizes16	16
Tabela 6 - Ponderações iniciais da rede (Fuzzy numbers) para classes de uso do solo.....22	22
Tabela 7- Localização de importantes localizações sobre a distribuição de água local Erro!	
Indicador não definido.	
Tabela 8 - Classes de Declividade29	29
Tabela 9- Estações Pluviométricas31	31
Tabela 10 - Classes do uso e ocupação do solo.....33	33
Tabela 11 - Escalas de Vulnerabilidade Proposta por Ross (1994).....34	34
Tabela 12 - Graus de Vulnerabilidade / estabilidade35	35
Tabela 13 - Notas estabelecidas para a declividade.....36	36
Tabela 14 - Matriz de comparação pareada.....36	36
Tabela 15 - Determinação dos pesos36	36
Tabela 16 - Quadro de autores que utilizaram RNA's.....40	40
Tabela 17 - Determinação dos pesos44	44
Tabela 18 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n44	44

Tabela 19 - Ponderação obtida a partir dos especialistas	47
Tabela 20 - Resultado da Rede Caso 1	48
Tabela 21 - Valor de “R” Coeficiente de Correlação e suas Interpretações	50
Tabela 22 - Valores de “R” Relacionados no Caso 1	50
Tabela 23 - Matriz pareada (Dados de Entrada).....	55
Tabela 24 - Resultado da Rede (Caso 2).....	55
Tabela 25 - Valores de “R” Relacionados (Caso 2).....	56
Tabela 26 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1	61
Tabela 27 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2	62
Tabela 28 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1	63
Tabela 29 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2	64
Tabela 30 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1	65
Tabela 31 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2	66
Tabela 32 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1	66
Tabela 33 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2	67
Tabela 34 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1	68
Tabela 35 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2	69
Tabela 36 – Comparação de Áreas Obtidas nas Comparações	72
Tabela 37 - Informações Kruskal-Wallis rank sum test.....	74
Tabela 38 - Comparações Múltiplas Caso 1	74
Tabela 39 - Comparações Múltiplas Caso 2	75
Tabela 40 - Correlação Qui-Quadrado de Homogeneidade dos Especialistas	75

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As ações antrópicas no espaço urbano provocaram abruptas modificações no meio, transtornando o equilíbrio natural. A quebra desta conformidade do equilíbrio ambiental aumenta a complexidade do ambiente, pois ao retirar os elementos de estabilidade, o meio perderá suas características naturais, ou seja, sua vegetação, características de relevo e solo entre outros.

A atuação direta do homem leva a grandes problemáticas para o ambiente encontram-se desafios maiores e mais complexos para soluções que envolvam mecanismos antrópicos e, ao mesmo tempo, permitam o entendimento dos processos que levam a acentuar os impactos ambientais. O esclarecimento desses cenários é de suma importância para a busca de soluções, tornando-se relevante a adaptação de métodos e estratégias de estudos sobre planejamento de unidades urbanas que demonstrem aspectos com maior coerência para a preservação, proteção e conservação das unidades de paisagem. (GUERRA, 1980).

Para se chegar a um entendimento sobre problemas ambientais é necessário observar a escala abordada e sua relação com a dificuldade de analisar suas especificidades. Por isso é recomendado que a bacia hidrográfica seja utilizada como unidade territorial de planejamento, pois trata-se de uma unidade consolidada de fenômenos internos à sua área (TRICART, 1977). Assim, esta unidade pode ser considerada um sistema físico que, entre outros efeitos, influencia no ciclo de águas precipitada no sistema, escoar até seu exutório, fazendo com que ocorra perdas por evaporação, transpiração e infiltração no solo (CÂMARA e MEDEIROS, 2001).

Os riscos naturais comumente percebidos nos centros urbanos têm suas consequências danosas agravadas devido, sobretudo, à ocupação irregular de áreas que apresentam uma dinâmica natural intensa e a precariedade de organização urbana, contribuindo para a

vulnerabilidade ambiental local. Vários estudos anteriores, como Medeiros et. al. (1996) e Tricard (1977), afirmam que uma das formas mais práticas de avaliar a dinâmica das bacias hidrográficas é o emprego dos zoneamentos ambientais. Esses zoneamentos procuram minimizar as vulnerabilidades e seus impactos através dos levantamentos das fragilidades a partir de inúmeras variáveis. A determinação de métodos adequados para o uso e ocupação do solo dos recursos naturais visa minimizar o impacto das ações antrópicas no espaço e subsidiar um desenvolvimento econômico sustentável local de curto, médio e longo prazo, associado a políticas públicas aplicadas a essas bacias hidrográficas, em especial aquelas localizadas em áreas urbanas.

Nesse contexto, pode ser realizada uma análise quantitativa de forma semiautomática através da aplicação de uma estrutura matemática que permita descrever e sistematizar a análise de fatores ambientais e antrópicos em uma bacia. Uma ferramenta de análise existente é a *lógica Fuzzy*, como forma de auxiliar os estudos dos problemas da área ambiental. Assim, no ambiente de uma bacia hidrográfica não possui somente uma realidade, geralmente existe conflitos entre várias realidades ambientais diferentes, como ambientes naturais e antropizados. Entre os estudos existentes para se chegar a isso destaca-se o trabalho de Ross (1990).

Ross (1990) sistematizou a análise morfodinâmica de Tricart (1977), acrescentando novos parâmetros para definir as unidades ecodinâmicas estáveis e instáveis em vários graus e posteriormente classificando-as de vulnerabilidade muito fraca a muito forte. Nesse trabalho Ross utilizou a Declividade como parâmetro de ponderação determinante. Contudo, Lago et. al (2009) também determinam que o conceito de unidade ecodinâmica, baseado na relação das variáveis de Morfogênese/Pedogênese, é fundamental para a avaliação do processo dinâmico de vulnerabilidade em bacias hidrográficas.

Uma das técnicas para realizar essas ponderações é a *Analytical Hierarchic Ponderation* (AHP). Essa técnica de análise é uma das mais utilizadas em estudos de vulnerabilidade ambiental, prospecção de minério (CUNHA 2001), seleção de área para disposição de resíduos (HAIR et al., 2005) e risco de movimento de massas suscetíveis a escorregamento (KOMAC, 2005).

Essa técnica parte da premissa da avaliação da consistência de ponderações, realizada por especialistas como forma de criar um vetor único que atribui valores de pesos para cada parâmetro analisado. Entretanto, existem alguns impedimentos nesse método devido ao fato de que a obtenção dos dados tem o caráter subjetivo inerente ao ser humano que faz as ponderações iniciais. Além disso, a técnica AHP somente avalia a consistência da matriz dominante do sistema sem realizar qualquer avaliação de ruídos presentes nas informações de entrada, portanto o problema elaborado dessa pesquisa é a inconsistência encontradas na obtenção de pesos para geração das bases cartográficas e a relevância dada a alguns dados que, em sua grande maioria, não condizem com as características reais do ambiente.

Por isso, esta pesquisa parte da hipótese de que técnicas fuzzy, como as Redes Neurais Artificiais (RNA), que podem contribuir no estabelecimento de parâmetros refinados na ponderação da AHP como forma de minimizar a subjetividade da técnica. As RNAs possuem a capacidade de aprender a inferir utilizando uma base de referência, com isso minimizando ruído de cada camada.

Giordano e Liersch (2011), adotam uma abordagem multicriterial e integrada, implementada como uma ferramenta baseada em “Lógica fuzzy” com tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para apoiar o monitoramento de dados ambientais. O apoio das análises em ambientes SIG se justifica na capacidade desses sistemas em lidar com dados espaciais de forma consistente e de relacionar atributos espaciais e não espaciais.

Nesse contexto, esta pesquisa busca estabelecer uma metodologia de aplicação de RNA na ponderação inicial de AHP, como forma de reduzir a subjetividade de especialistas no estabelecimento dos critérios de decisão de avaliação de vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas. Por isso, serão avaliados os mesmos parâmetros espaciais de análises mais comuns na literatura: uso e ocupação do solo, pedologia, pluviometria e declividade, na tentativa de estabelecer as ponderações entre essas camadas no ambiente SIG.

1.2 – Justificativa

A relevância desta pesquisa se dá pela grande demanda de trabalhos que utilizam método AHP (Análise Hierárquica de Ponderação) para estudos ambientais. Entretanto, na literatura alguns autores criticam a aplicação desta técnica neste contexto. GOODWIN e WRIGHT (2000) resumem as críticas sobre a AHP em um item: os pesos são obtidos sem referência às escalas nas quais os atributos são medidos, podendo significar que as questões são interpretadas de modos diferentes, e possivelmente de forma equivocada, pelos agentes de decisão. LOOTSMA (1990) observou a dificuldade que os agentes de decisão encontram para escolher uma dentre as qualificações verbais para expressar suas preferências por uma entre duas alternativas, principalmente quando seus desempenhos são expressos em valores numéricos.

Neste contexto de incertezas, este trabalho encontra a justificativa na aplicação das redes neurais artificiais (RNAs) na elaboração de modelos de Vulnerabilidade Ambiental, empregando os conhecimentos e experiências de especialistas na área em questão, de forma a reduzir os ruídos do processo de elaboração das ponderações nas informações espaciais na criação deste tipo de modelo de vulnerabilidade.

1.3- Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral a utilização das RNA (Redes Neurais Artificiais) para reduzir a subjetividade no estabelecimento das ponderações iniciais da matriz dominante na análise da AHP no contexto de vulnerabilidade ambiental.

1.3- Objetivos Específicos

- Elaborar a carta de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Córrego do Fundo com a utilização da técnica AHP através de consulta a especialistas, considerando os parâmetros de Declividade, Pedologia, Precipitação e Uso do Solo
- Criar Redes Neurais com diferentes configurações baseadas na literatura para avaliar a ponderação inicial dos valores informados por especialistas.

-
- Avaliar as diferenças entre as redes e a AHP, tomando essa como parâmetro de avaliação, na tentativa de avaliar a significância das propostas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definições Gerais

Segundo Rocha & Kurts (2001), o monitoramento da deterioração do meio ambiente é realizado em unidades tradicionais de planejamento como a bacia hidrográfica, propriedades rurais e municípios. A bacia hidrográfica e as regiões fisiográficas são consideradas unidades naturais de planejamento.

Atualmente, encontram-se na literatura vários conceitos sobre bacia hidrográfica, como Tucci (1994) e Cirstoflet (1999). Percebe-se nesses autores grande semelhança conceitual, baseado na área de concentração de determinada rede de drenagem. Entretanto, as definições que envolvem as subdivisões da bacia hidrográfica (sub-bacia e microbacia) apresentam abordagens de diferentes fatores físicos e ecológicos. Barrella, et al (2001) define bacia hidrográfica, como um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas escoam superficialmente formando os riachos e rios ou infiltram no solo para formação de nascentes e lençol freático.

O Decreto-lei nº 94.076/87, que estabelece a criação do Programa Nacional de Microbacia Hidrográfica (PNMH), define o termo como sendo uma “área drenada por um curso d’água e seus afluentes, a montante de uma seção transversal, para a qual convergem as águas que drenam a área considerada” (BRASIL, 1987).

Botelho (1999) define bacias hidrográficas como unidade natural de estudo. São unidades ideais para o planejamento de uso das terras, onde é possível reconhecer e estudar as inter-relações entre os diversos elementos da paisagem e os processos que atuam na formação das estruturas litológicas.

Tundisi (2005) destaca que a gestão por bacias hidrográficas oferece ainda uma oportunidade única de integrar pesquisa, gerenciamento e participação da comunidade na gestão da disponibilidade, demanda e integração quantidade/qualidade de seus componentes biogeofísicos, econômicos e sociais.

As sub-bacias são áreas de drenagem dos tributários do curso de água principal. Para definir sua área a literatura e os pesquisadores da área utilizam-se de diferentes unidades de medida. Para Faustino (1996), as sub-bacias possuem áreas maiores que 100 km² e menores que 700 km². Já para Martins et al., (2005), são áreas entre 20.000 ha e 30.000 ha (200 km² a 300 km²). Para Santana (2004), bacias podem ser desmembradas em um número qualquer de sub-bacias, dependendo do ponto de saída considerado ao longo do seu eixo-tronco ou canal coletor.

Cecílio e Reis (2006) definem a microbacia como uma sub-bacia hidrográfica de área reduzida, não havendo consenso de qual seria a área máxima (máximo varia entre 10 a 20.000 ha ou 0,1 km² a 200 km²). Faustino (1996) ainda comenta que a microbacia possui toda sua área com drenagem direta ao curso principal de uma sub-bacia, várias microbacias formam uma sub-bacia, sendo a área de uma microbacia inferior a 100 km².

A microbacia hidrográfica oferece, portanto, a vantagem de um gerenciamento simultâneo, interdependente e cumulativo de seus aspectos econômicos, sociais e ambientais, através da possibilidade de realizar um planejamento e administração integrada dos recursos naturais, solo e água, ampliando assim, notavelmente, a sinergia e a potencialidade dos processos operados, além de oferecer condições geográficas e sociais favoráveis à organização comunitária (SABANÉS, 2002).

Para o estudo de microbacias, entende-se que a atuação do homem no meio natural é complexa e intensa, considerando que os processos morfodinâmicos estabelecem a relação direta com o meio natural e dessa forma possibilita uma classificação ecodinâmica do meio (NOBRE, 2008).

A noção de vulnerabilidade tem sido matéria de discussão, com destaque para as considerações realizadas por Rebelo (2003) que apresenta esse termo como a vulnerabilidade de um meio a modificações significativas, causando o seu desequilíbrio sistêmico. Esta definição concorda com a metodologia proposta por Tricard (1977), na qual, trabalha em função da intensidade do processo, e se difere em três grandes tipos: Meio Estável, Meio Intergardes e Meio Fortemente Instável conforme apresentado no Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Função da Intensidade do Processo

Meio Estável	Meio Intergardes	Meio Fortemente Instável
Os processos ocorrem constantemente, mas de maneira lenta; Resultante da permanência no tempo de combinação de fatores; Prevalece a pedogênese;	Trata-se de uma passagem gradual entre os meios estáveis e instáveis; Caracteriza-se pela concorrência permanente;	Têm como característica principal a forte predominância da morfogênese; Prevalece completamente sobre a pedogênese;

Fonte: Tricard (1977), adaptada pelo autor.

O zoneamento é utilizado como pressuposto básico para o levantamento das características naturais do ambiente, integrando informações socioambientais com a dinâmica dos componentes do meio (NOBRE, 2008). A mesma ainda comenta que aliado ao zoneamento é necessário mensurar a vulnerabilidade que esses ambientes apresentam as ações antrópicas.

Essa espacialização da vulnerabilidade analisa o espaço em função de seus diferentes níveis de suscetibilidade (TRICARD, 1977). Ao alcançar esses níveis, poderá iniciar a indicação das áreas onde essa vulnerabilidade é maior ou menor, adequando assim as ações quanto a sua capacidade de suporte ambiental (NOBRE, 2008). Baseados nas ideias de Tricard (1977) dois autores propuseram métodos para obtenção da vulnerabilidade: Ross (1994) e Crepani et al. (1996).

Ross (1994) baseou seu método no conceito de unidade de paisagem, diferenciando em ambiente de equilíbrio dinâmico, levando em consideração que o ambiente está em estado natural (intocado) ou instável que teoricamente possuem uma intervenção atuante no

sistema, quebrando o equilíbrio sistêmico. Esse método é pautado sobre quatro variáveis básicas: Declividade, Cobertura Vegetal/Uso do Solo, Pedologia e Clima (Precipitação). Ross (1994) afirma que essa metodologia possui boa aplicabilidade em escalas médias e pequenas, ou seja, até 1:250.000.

Crepani et. al. (1996) desenvolveu um método que se norteia na utilização de unidades ecodinâmicas de Tricard (1977) e embasado nas Unidades Terrestres Básicas (UTBs) na qual obtém as informações necessárias para análise do método através de imagens de satélites. De acordo com os autores o método é embasado em cinco variáveis básicas: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Uso do Solo/Vegetação e Clima (Precipitação).

Ao analisar os dois métodos, Spörl (2001) mencionou algumas diferenças básicas entre os mesmos. A primeira diferença observada é a funcionalidade dos modelos. Ross (1994) faz uma análise separada de cada tema para depois obter uma síntese e assim classificar suas unidades. O modelo de Crepani et. al. (1996) identifica primeiramente essas unidades para posteriormente realizar o cruzamento dos atributos.

A segunda diferença relevante encontrada foi a variabilidade na distribuição das classes e sua forma de cálculo. Ross (1994) propõe em seu modelo uma hierarquização da vulnerabilidade através da combinação de pesos unitários, fazendo referências as variáveis de vulnerabilidade, onde o primeiro dígito faz referência às feições geomorfológicas (declividade) e possui peso determinante para o modelo, e as outras variáveis serão hierarquizadas secundariamente. Crepani et. al. (1996) determinam os graus da vulnerabilidade através da aplicabilidade de uma média ponderada entre as variáveis, partindo do entendimento que todas as variáveis têm a mesma importância para se alcançar os níveis de vulnerabilidade das UTBs.

Spörl (2001) destaca que os dois modelos possuem uma aplicabilidade aceitável para fornecer informações básicas sobre as nuances ambientais, mas não substitui uma análise de campo. Porém, ressalta que para trabalhos mais abrangentes, possuem boa confiabilidade para obtenção de dados ambientais.

2.2- Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

De acordo com Silva (1999) e Saboya (2000), existem complicações na definição de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), pois vários autores expõem diferentes significados, e isso é resultado da grande variedade de utilizações que existe nesse tipo de sistema e que em consequência acaba gerando diferentes abordagens do assunto.

Para Burrough (1986), a definição do SIG se resume em um sistema implementado em computador, com uma ampla quantidade de ferramentas, que tem como função adquirir, recolher, manipular, analisar e visualizar dados espaciais referenciados ao mundo real. O autor ainda divide os dados espaciais em suas três naturezas: a) dados geográficos: são os mapas compostos por dados do espaço; b) atributos: que são formados por valores alfanuméricos e são armazenados em tabelas; c) relações topológicas: que são as características espaciais entre os elementos.

Segundo Câmara e Medeiros (2001), as ferramentas computacionais para Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), os qual, realizam análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Com finalidade de monitorar e diminuir os problemas ambientais, os SIG's, aliados a técnicas de geoprocessamento, proporcionam grande potencial, uma vez que permitem o acúmulo e a manipulação de grandes números de dados e informações, bem como a representação cartográfica dessas variáveis, possibilitando na tomada de decisão uma economia de recursos e tempo, como descrito por Zanata et al. (2012).

Conforme Saboya (2000), dentre as estruturas de dados espaciais em sistemas de informações geográficas, pode-se citar a estrutura matricial (raster) e a estrutura vetorial (vector). Os dados vetoriais se baseiam na representação dos objetos espaciais em três elementos: ponto, linha e polígono. Porém, existem condições quanto a forma de realizar a vinculação entre dados espaciais e não espaciais.

A estrutura raster é formada por uma matriz de pontos ou células (Pixel) com dimensões constantes, para cada ponto representado existe uma porção quadrada de área. A localização é representada pelo sistema de coordenadas geográficas do centroide da célula,

desta forma cada ponto é formado por coordenadas x, y e mais uma terceira sem representação espacial. No entanto, alguns exemplos que podem ser citados como atributos não espaciais numa matriz de pontos como a altitude ou declividade em um relevo, o tipo de solo, ou a quantidade de chuva de determinada área num determinado período de tempo (Saboya, 2000).

Conforme Silva (1999), o uso do geoprocessamento na função de classificar ambientes de acordo com suas características tem beneficiado o planejamento e a gestão de ambientes. Silva (1999) ainda explica que no geoprocessamento são manipulados uma grande quantidade de dados que exigem técnicas computacionais e são disponibilizados atributos topológicos para fins de análises, sínteses e utilização no planejamento ambiental e na gestão territorial.

Entre as várias funções de softwares de geoprocessamento, cita-se a extração de informações georreferenciadas de parcelas do espaço geográfico a partir do cruzamento e da análise de vários mapas temáticos. Quando é gerado o material em formato digital é possível ter uma visão sobre vários componentes do ambiente como: solo, geologia, geomorfologia, uso e cobertura vegetal, declividade, dentre outros (Faria et al., 2003).

A extração de informações pode ser útil no conceito que é usado para a definição de medidas não estruturais, pois, com essas informações podem ser gerados mapas de previsão e alerta de inundações e o zoneamento das áreas de risco de inundação.

2.3- Métodos de Apoio a Tomada de Decisão

Os modelos citados acima são baseados na análise multicriterial, usada amplamente como método de apoio a tomada de decisões, baseando-se na análise das alternativas para a resolução dos problemas ambientais e sendo auxiliado por características naturais, atributos e pesos vinculados as temáticas ambientais (FIDALGO, 2003).

Sistemas de Suporte a Decisão (SSD) são sistemas, em geral, computacionais que tem como finalidade auxiliar o usuário a tomar decisões na solução de problemas. A resolução do problema exige uma grande interação entre o homem e a máquina, atributo que

constitui a principal característica de uma SSD (SPÖRL 2004). Ao se tratar de dados espaciais, grande parte dos SSD são desenvolvidos com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os SIG possuem um método característico que é o cruzamento de dados espaciais que auxiliam na elaboração de hipóteses através da criação de modelos e com isso fornece apoio às decisões tomadas por especialistas.

Visando a aplicabilidade prática desses modelos supracitados, diversas técnicas que utilizam características de análises multicriteriais foram propostas como a *Analytic Hierarchy Process* – AHP por Saaty (1977), ELETRE III por Roy (1978), PROMETHEE I por Brans (1982) e Programação por Compromisso – CP por Simonovic (2004).

Ruhoff et al. (2005), constataram em seus estudos a existência de inúmeras técnicas que dão suporte a tomada de decisões. Dentre estas técnicas podem ser destacados os modelos Booleanos, no qual se caracterizam por modelos rígidos e lineares, Média Ponderada, que consiste na média ponderada dos valores de cota das amostras vizinhas, *Analytic Hierarchy Process* (AHP), que ajuda a organizar e estabelecer um modelo racional de combinação de dados, Bayesiano e Redes Neurais Artificiais (RNA's). Dentre essas técnicas um dos mais utilizados para a resolução desses problemas é a AHP.

2.3.1- A Técnica AHP - *Analytic Hierarchy Process*

Conforme Silva e Nunes (2009), a *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi proposta por Saaty (1977) e é usado para a criação de uma hierarquia de decisão, sendo composto por níveis hierárquicos que permitem uma visualização mais ampla sobre as relações que estão sendo processadas, como apresentado na Figura 1. Para formular o nível de importância de cada fator da hierarquia, são elaboradas matrizes de comparação entre os níveis, onde tais níveis serão ponderados.

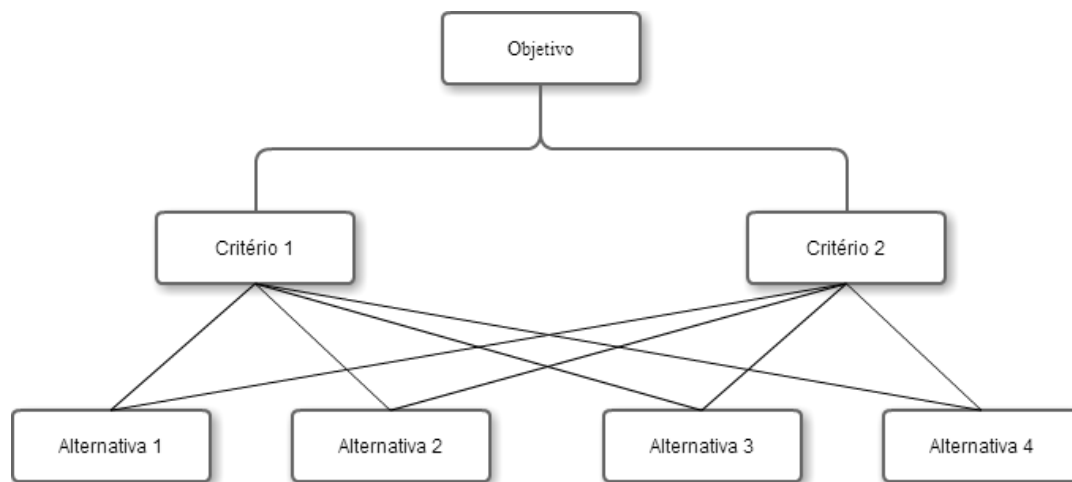


Figura 1 - A Hierarquia do AHP
Fonte: Saaty (1977)

Ainda conforme Silva e Nunes (2009), a técnica é baseada em um processo de escolha através da lógica de comparação par a par (*pairwise comparison*). A técnica é pautada em diferentes fatores, sendo que tais fatores influenciam no processo da tomada de decisão através da organização hierárquica. Após a organização das variáveis, os fatores são comparados entre si, resultando nos pesos para cada uma das variáveis. Os valores encontrados constituem-se em uma importância relativa para cada variável, assim definindo uma escala de quanto um fator predomina sobre o outro.

Para aplicação dessa técnica, um ou mais especialistas precisam diagnosticar quais variáveis ambientais são importantes e julgar uma determinada ordenação relativa de importância. Isto é realizado pela formação de um modelo hierárquico, o qual geralmente é combinado por meta, critérios, subcritérios e alternativas; e um método de comparação pareada por importância relativa, preferências ou probabilidade entre dois critérios, com relação ao critério no nível superior.

A técnica AHP converte os julgamentos realizados por especialistas para cada fator em números através da hierarquia estabelecida para os diferentes fatores, esses poderão ser comparados entre si pela matriz. Cada alternativa e fator são colocados na matriz de comparação com valores entre 1/9 e 9, conforme a Tabela 2 apresenta (PINESE JUNIOR,

2010). Essa matriz é chamada de matriz de comparação par a par, matriz dominante ou matriz de decisão (SAATY, 1977).

Tabela 2 - Escala de comparação de Saaty (1977)

<i>Valores</i>	<i>Importância Mútua</i>
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que
	*Os valores 2,4,6 e 8 podem ser usados como intermediários

Fonte: Saaty (1977)

A aplicação da AHP estabelece uma relação de importância relativa entre as classificações. Essa matriz é usada como dado de entrada em uma matriz de comparação pareada, para calcular o autovalor e autovetor da matriz. Os pesos equivalem aos elementos do autovetor da matriz de comparação pareada. Essa técnica admite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos.

Saaty (1977) afirma que uma comparação par a par dos critérios estipulados por atribuições qualitativas é que diferenciam cada par de critério. A AHP utiliza uma escala (Tabela 3) com nove valores que expressam a importância de cada critério em comparação a outro (MIRANDA, 2010).

Tabela 3 - Matriz de Comparação Pareada

<i>Fatores</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>
F1	1	1/3	1/5	1/7
F2	3	1	1/3	1/5
F3	5	3	1	1/3
F4	7	5	3	1

Fonte: Autor (2015)

Cada coluna da matriz dominante é então somada e cada ponderação atribuída é ponderada pela soma da coluna correspondente. A média, calculada pela somatória da linha correspondente a cada parâmetro listado e ponderado pelo número de parâmetros, fornece o que Saaty (1977) chama de prioridade do parâmetro, ou seja, o peso inicial desse parâmetro na análise. O resultado dessa etapa é um autovetor em que cada valor apresentado representa uma ponderação a ser atribuído ao critério correspondente. Esse autovetor é normalizado, ou seja, os pesos variam de 0 a 1, sendo que a somatória de todos os pesos calculados é 1.

Para confirmação dos pesos estatísticos calculados, se os mesmos são aceitáveis, calcula-se a Razão de Consistência (RC), que de acordo com Saaty (1977), deve apresentar valor menor do que 0,10 (10%). Essa correlação está vinculada ao autovetor de maior valor, sendo que a consistência não pode ultrapassar 10% de seu valor máximo e é obtida pela Equação 1.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (1)$$

Onde,

RC é a razão de consistência. (%)

IC é o índice de consistência. (%)

IR é o índice aleatório dado pelo índice da matriz dominante, conforme os valores expressos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n.

n	2	3	4	5	6	7
IR	0,0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32

Fonte: Adaptado de Saaty (1977)

O IC verifica se os coeficientes da matriz produzirão uma estimativa que é calculada pela Equação 2. Com relação à confiabilidade do IC, Dyer (1990) argumentou que os axiomas da AHP não são fundamentados em descrições do comportamento racional passíveis de teste. Bana e Costa e Vansnick (2001) propôs em seu artigo uma das críticas mais contundentes a AHP, descrevendo um problema que ocorre no cálculo do vetor de prioridades, mais especificamente nas escalas derivadas da técnica a partir da matriz

positiva recíproca que é preenchida após os questionamentos feitos ao agente de decisão (Tabela 5). Tal problema implica fundamentalmente na quantificação das prioridades e não na ordem em que as alternativas são priorizadas. Outro ponto também ressaltado por Bana e Costa e Vansnick. (2001) é que o coeficiente de inconsistência proposto por Saaty não seria capaz de detectar tal situação.

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

Onde,

n é o número de variáveis usadas (número de colunas ou linhas);

Onde λ é o autovalor que é obtido com a Equação 3, na qual, é apresentada a baixo::

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]}{w_i} \quad (3)$$

Em que,

Tabela 5 - Cálculo de Aw a Partir do Produto das Matrizes					
	1	1/3	1/5	1/7	P_1
Aw =	3	1	1/3	1/5	P_2
	5	3	1	1/3	P_3
	7	5	3	1	P_4

Para atingir o cálculo dessa matriz, é necessário o entendimento do cálculo manual de Aw_1 na equação 4, na qual consiste em multiplicação par a par, com a somatório simultânea dos valores para chegar nos pesos.

$$Aw_1 = \left(1 \cdot P_1 + \frac{1}{3} \cdot P_2 + \frac{1}{5} \cdot P_3 + \frac{1}{7} \cdot P_4 \right) \quad (4)$$

Saaty (1977) propõe em seu trabalho uma estrutura de nove fatores, mas ao analisar outros trabalhos, observa-se a utilização de um número muito maior de fatores. Maganhoto et al (2011), para estudo de adequação ao ecoturismo, propõem a utilização de 36 variáveis diferentes, Komac (2005) e Vahidnian et al (2010), para modelagem da suscetibilidade a deslizamentos de terra, utilizaram 15 fatores.

Ao analisar as tabelas de cruzamentos pareados, observa-se somente uma expansão da tabela com a divisão total pelo número de elementos, ou seja, os “n” fatores e dividido em uma escala de 0 a 1. Trabalhando da mesma forma encontram-se alguns problemas, pois o valor predominante se tornará algumas vezes mais importante dependendo do número de classes.

Entendendo essa inconsistência como erros significantes, essa pesquisa pretende aplicar as Redes Neurais Artificiais para otimizar essas ponderações de entrada com suas técnicas de treinamento utilizando algoritmos matemáticas para teste.

2.3.2- Redes Neurais Artificiais (RNA's)

Os primeiros autores a proporem a temática de redes neurais foram McCulloch e Pitts (1943), que projetaram a estrutura conhecida como a primeira rede neural. Eles estabeleceram um modelo de neurônios como uma unidade de tratamento binário e comprovaram que esta unidade possui a capacidade de processar várias operações lógicas.

Foi em meados dos anos 50 que apareceram os trabalhos mais inovadores na área, pois foram propostas novas técnicas e descobertas novas características do cérebro humano, assim estimulando o desenvolvimento de novos modelos de organização das redes neurais (GEROMEL, 2003). Na década de 80, com a introdução do algoritmo de retroprogramação, permitiu testar e evoluir os modelos já existentes.

As Redes Neurais Artificiais consistem em um conjunto de técnicas computacionais inspiradas na estrutura neural de organismos inteligentes ou Inteligência Artificial (IA) e se utilizam da experiência para adquirir conhecimento (CARVALHO, 1999). Também possuem a capacidade de resolver problemas por intermédio de circuitos simples que simulam o funcionamento do cérebro humano (GEROMEL, 2003).

De acordo com Silva e Nunes (2009), a rede neural mais simples é o *perceptron*, amplamente utilizado na classificação de padrões de dados como no datamining e sensoriamento remoto. Ainda de acordo com o mesmo autor, quando essa rede é utilizada

em uma única camada, é capaz de solucionar problemas lineares que são caracterizados por grupos de dados que podem ser separados por uma reta (Figura 2).

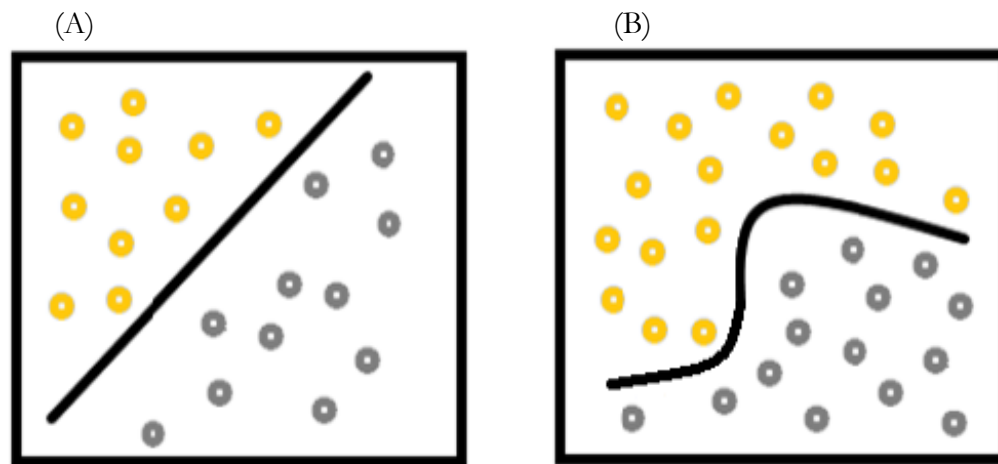


Figura 2 - A = Demonstração de Sistema Linear; B = Sistema não Linear
Fonte: Souza (2010).

O algoritmo regra-delta de aprendizagem simples possui a capacidade de treinar as redes *perceptrons*, calculando os erros entre os dados de saída encontrados pela rede e os dados desejados (dados reais) (SOUZA 2010). Essa técnica funciona conforme esquema apresentado na Figura 3:

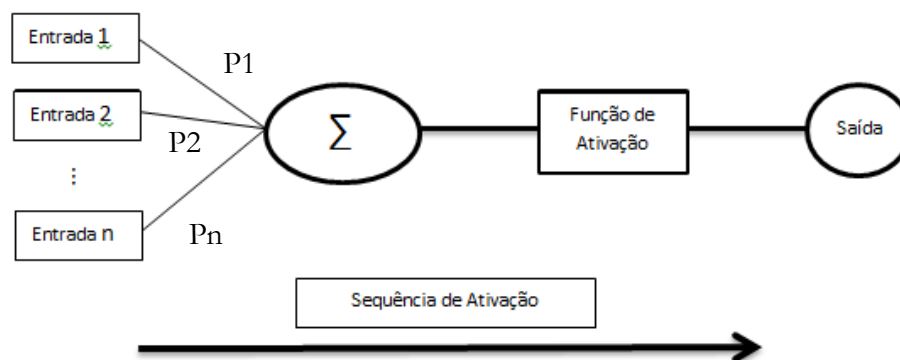


Figura 3 - Funcionamento Função Perceptrons
Fonte: Adaptado de (CARVALHO, 1999)

A figura anterior representa as seis etapas que a função irá ser processada, em que a primeira consiste na leitura dos dados de entrada (os dados de entrada estão vinculados as

variáveis ambientais), em seguida é submetida a multiplicação por pesos - P_1, P_2, \dots, P_n (esses pesos são ponderações elaboradas por métodos estáticos, como no AHP). Após esse passo será submetida a somatória dos resultados, logo em seguida comparados a somatória dos dados intermediários e finalizando o processo será aplicada a função de ativação (essa função de ativação poderá ser: Sigmoidal, Linear, Tangente e Degrau) e obtido os dados de saída.

As RNA's multicamadas comportam uma ou várias camadas escondidas no processo intermediário (Nós) e apresentam uma camada de saída (figura 4). Nesse ponto, o sinal de entrada é espalhado de forma unidirecional até alcançar os nós de saída. Esse tipo de rede, juntamente com o auxílio do *backpropagation* (algoritmo de treinamento), é utilizado amplamente para a solução de problemas complexos em várias áreas de atuação, principalmente na área das engenharias (CIFUENTES et al 2011). Esse algoritmo retroalimenta a rede para avaliar se as ponderações fornecidas permitem atender os critérios de treinamento da rede.

De acordo com Cifuentes et al (2011) esse método se divide em três fases:

- Utiliza uma função de ativação linear, sigmoide, triangular, entre outras;
- Existência de neurônios nas camadas intermediárias responsável pelo processo;
- Grau de conectividade entre os neurônios de cada camada;

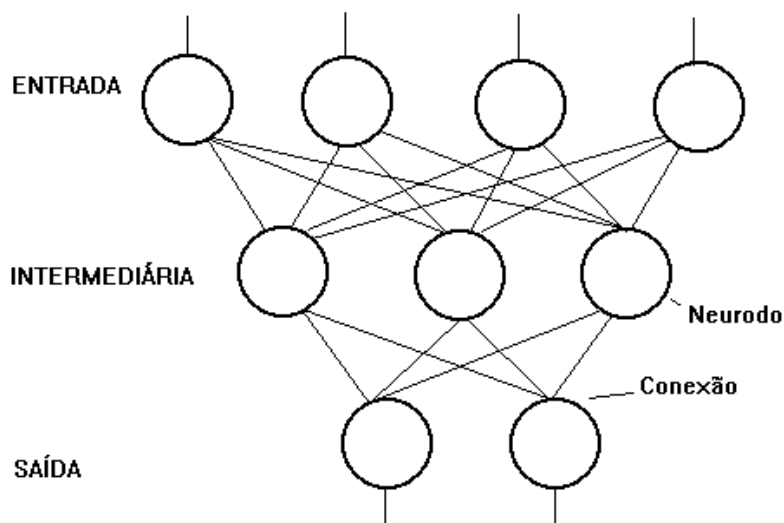


Figura 4 - Arquitetura de um “perceptron” de três camadas.

Fonte: Sabbatini et al. (1995)

Castro (1998) ressalta que para se estabelecer a quantidade de neurônios na camada oculta, parte-se de uma regra empírica a qual recomenda que esse número esteja entre o número de dados de entradas e dados de saída, ou seja, em uma rede com cinco dados de entrada e um dado de saída será necessário testar 4, 3 e 2 camadas para se alcançar o valor de menor erro.

Alves (2007) demonstra que o método de treinamento dessa rede é denominado de retropropagação ou *backpropagation* (primeiro método de treinamento das RNA's), no qual consiste em duas etapas, sendo (figura 5):

- *Forward*: execução da rede a partir da camada de entrada;
- *Backward*: retroalimentação com os resultados da foward propagation (retropropagação);

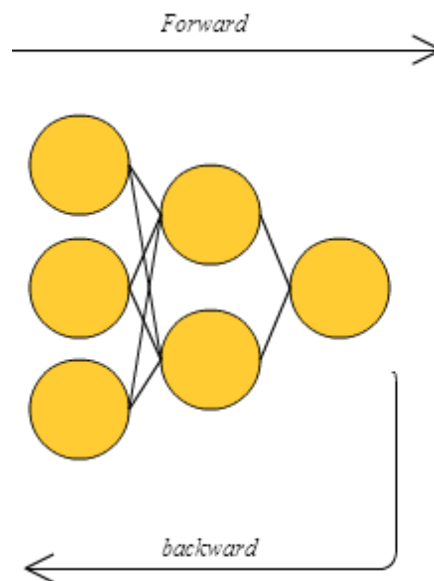


Figura 5 - Arquitetura do processo de feed-forward e backpropagation.
Fonte: Adaptado de Alves (2007)

Como demonstrado na Figura 5, no processo de *Forward* os valores que são aplicados na camada de entrada e posteriormente multiplicados são passados a diante, camada por camada, até a camada de saída, elaborando um conjunto de valores como resposta ao problema e em seguida esses valores são comparados com os dados de treinamento. Caso esses valores sejam iguais ou dentro do erro aceitável proposto, será calculado um erro que

reprogramara os dados em entrada. Ao ser estipulado esses dados de entradas, conforme a figura 5, as funções de ativação serão acionadas fornecendo o *Forward*.

As funções de ativação podem ser representadas em um sistema de eixos ortogonais normalizados cujos valores variam entre -1 e 1. Nesse espaço o comportamento da função descreve o valor normalizado do atributo numa relação $y = f(x)$ (Figura 6).

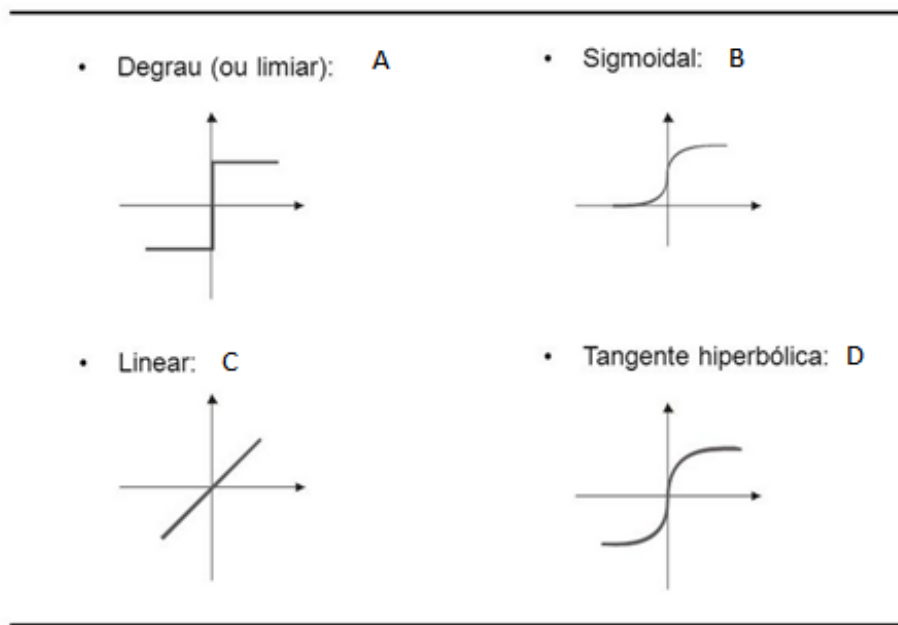


Figura 6 - Funções de Ativação
Fonte: Alves (2007)

O sistema de equações que representa o comportamento da ativação dos neurônios de cada camada está representado na Equação 5. Este sistema de equações é responsável por ativar um neurônio em determinada camada. A rede procura criar uma série de sistemas definindo os limites a , b e c para cada ligação entre neurônios envolvidos na construção da rede.

$$F = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{for } b \leq x \leq c, \\ 0 & \text{for } x > c, \end{cases} \quad (5)$$

Segundo Komac (2005), as funções de ativação aplicadas aos parâmetros são descritas em função dos seus pontos de inflexão, ou seja, sempre que houver uma mudança de direção na função de ativação ou pertinência, o valor do atributo deve ser identificado. A Tabela 6 apresenta a função trapezoidal para uma série de classes de uso do solo.

Tabela 6 - Ponderações iniciais da rede (Fuzzy numbers) para classes de uso do solo.

	<i>Floresta</i>	<i>Agricultura</i>	<i>Carga Hidráulica</i>	<i>Descarga d'água</i>	<i>Cidade</i>	<i>Estrada</i>	<i>Ondulação</i>
Floresta	[1,1,1,1]						
Agricultura	[1,5,2,4,4,5]	[1,1,1,1]					
Carga Hidráulica	[2,5,3,5,5,5]	[1,5,2,4,4,5]	[1,1,1,1]				
Descarga d'água	[2,5,3,5,5,5]	[2,5,3,5,5,5]	[1,5,2,4,4,5]	[1,1,1,1]			
Cidade	[3,5,4,6,6,5]	[2,5,3,5,5,5]	[2,5,3,5,5,5]	[1,5,2,4,4,5]	[1,1,1,1]		
Estrada	[4,5,5,7,7,5]	[3,5,4,6,6,5]	[2,5,3,5,5,5]	[2,5,3,5,5,5]	[1,5,2,4,4,5]	[1,1,1,1]	
Ondulação	[5,5,6,8,8,5]	[4,5,5,7,7,5]	[3,5,4,6,6,5]	[2,5,3,5,5,5]	[2,5,3,5,5,5]	[1,5,2,4,4,5]	[1,1,1,1]

Fonte: Adaptado de Komac (2005)

Na Tabela 6, a classe Agricultura é descrita numa função trapezoidal com os limites probabilísticos como sendo: limite inferior esquerdo igual 1,5; limite superior esquerdo como 2, limite superior direito 4; e limite inferior direito 4,5. Outras funções são disponíveis como a *triangular fuzzy number* (TFN), a sigmoidal ou a hardline.

Dentro do treinamento os parâmetros que são ajustados dentro das redes são: taxa de aprendizagem, erro e momentum. Esses parâmetros serão ajustados de forma empírica até atingirem parâmetros de erros aceitáveis.

O tempo de treinamento pode influenciar vários fatores e sua duração, mas sempre será necessário usar algum critério de parada. O algoritmo *backpropagation* usa critérios de parada não tão bem definidos e em sua grande maioria é utilizado o número de ciclos máximos (SPÖRL 2001). O mesmo autor ainda comenta que se deve sempre ficar atento a taxa de erro médio por ciclo, e sua capacidade de generalização da rede. Outro problema que deve ter atenção é o *overtrainnig*, que consiste na generalização do treinamento causando uma degradação na rede e especializando no conjunto de dados de treinamento.

O treinamento deve ser parado quando a rede em questão apontar uma boa capacidade de generalização e quando a taxa de erro for menor ou igual ao erro admitido, assim encontrando um ponto ótimo de parada com o menor erro possível para generalização (SPÖRL 2001).

Em sistemas fuzzy, as transições entre as diversas possíveis funções podem apresentar sobreposições, como na figura 7. Estas sobreposições entre funções são caracterizadas pela capacidade desses sistemas em avaliar a situação como uma porcentagem de pertencimento do dado a uma ou outra função, diferente de sistemas dicotômicos.

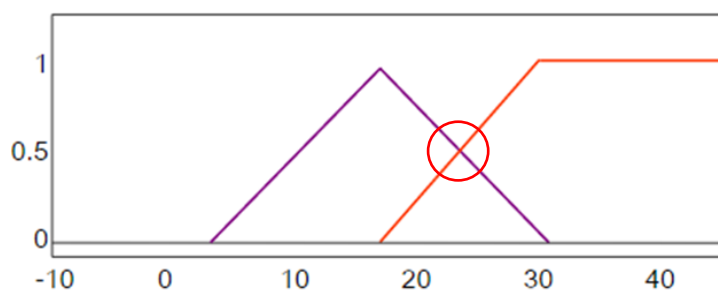


Figura 7 - Exemplo de função de sobreposição
Autor: SPÖRL (2001)

Ao analisar esse método de RNA, observou-se que o software MATLAB possui um grande poder de tratar cálculos numéricos. Sua importância engloba uma vasta parte da matemática e capacidade gráfica, que para uma análise do treinamento de uma rede, é fundamental para interpretação posterior de dados.

O MATLAB apresenta uma ferramenta para aplicação das RNA's, chamada de NNTOOLS. Esta ferramenta fornece funções e rotinas para modelagem de sistemas não-lineares complexos que não são facilmente modelados com uma equação de forma fechada. Esses algoritmos utilizam uma combinação dos mínimos quadrados e métodos de back-propagação com mensuração de gradiente de variação nos ajustes da rede para modelar um conjunto de dados de treinamento.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- Área de Estudo

A área definida para o estudo está localizada no estado de Minas Gerais, na mesorregião do Triângulo Mineiro, mais especificamente no município de Carmo do Paranaíba. “Localizado entre as coordenadas geográficas 19°03’23” e 19°03’00” de latitude S e 46°25’10” e 46°12’60” de longitude O (Figura 8).

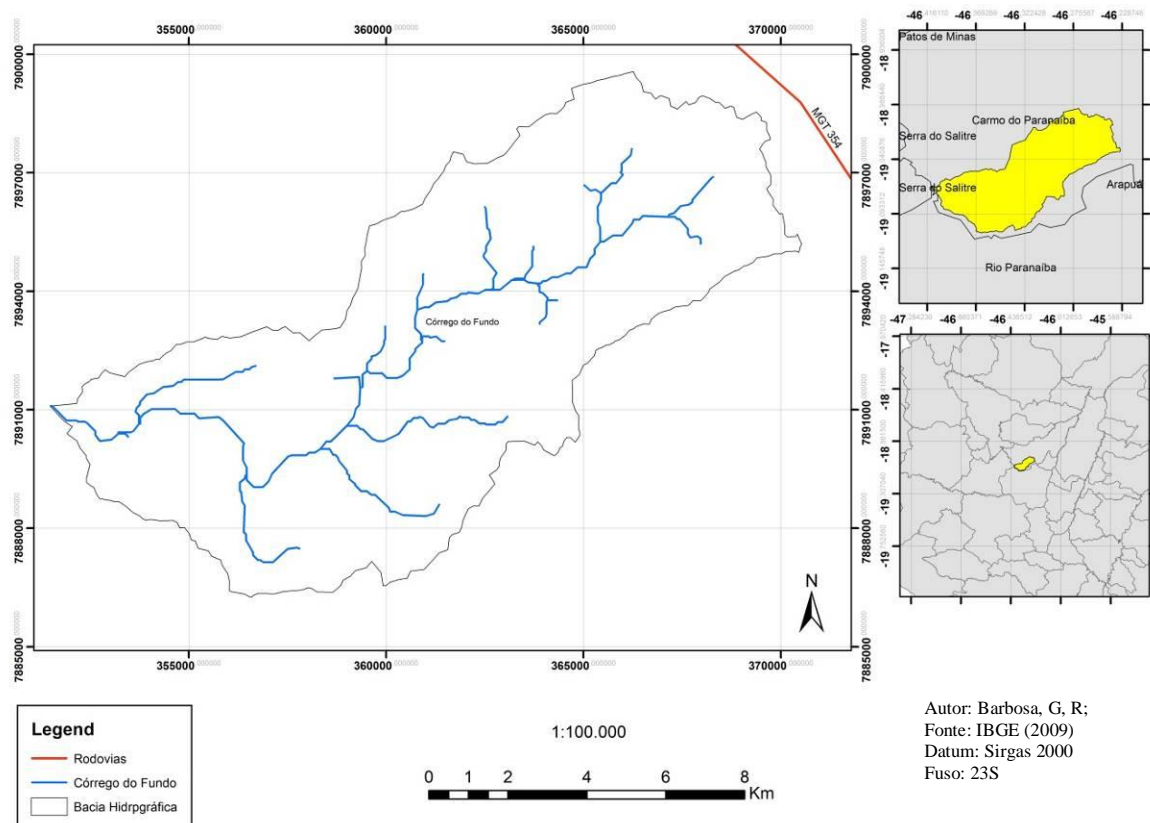


Figura 8 - Localização da área de estudo

O clima da região é classificado como Aw (clima tropical com estação seca de inverno) segundo a classificação de Köppen e possui temperaturas médias anuais de 20,4°C com médias máximas de 28,5°C e mínimas de 12°C. A região (Figura 8) tem pluviosidade

média anual de 1470 mm (FELFILI et al., 1999). A região estudada possui períodos secos que duram entre quatro e cinco meses por ano, com disponibilidade hídrica entre 10 e 20 litros por quilômetro quadrado (Portal Dos Comitês De Bacia De Minas Gerais, 2014).

Cabe ressaltar a localização de importantes pontos de captação do sistema de abastecimento da cidade de Carmo do Paranaíba (Tabela 7), que pode sofrer com influência das propriedades vizinhas e acarretar alterações tanto na qualidade ambiental quanto na água distribuída na cidade. De acordo com o IBGE (2012) Carmo do Paranaíba, possui uma população de 29 752 habitantes, na qual é abastecida por três pontos alocados na bacia do córrego do Fundo.

Tabela 7- Localização de importantes localizações sobre a distribuição de água local

<i>Pontos</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
Captação de Água 1	-19,02	-46,27
Captação de Água + Elevadora 2	-19,03	-46,22
Captação de Água (Reserva) 3	-19,01	-46,27
Captação de Água 4	-19,04	-46,32

Fonte: Copasa (2015)

Organizador: Autor (2015)

Segundo o Ministério de Minas Gerais (2014), existem evidências que há contaminação dos recursos hídricos dessa bacia, onde está afetando diretamente os moradores dessa cidade.

3.2. Procedimentos Metodológicos

Os processos metodológicos adotados envolvem cinco etapas diferentes, apresentada na Figura 9, na qual a primeira consiste no levantamento de dados para as variáveis que serão utilizadas na avaliação e a segunda etapa é a seleção dos dados de acordo com os modelos de vulnerabilidade de Ross (1994), que usa como embasamento classes de declividade como valor dominante. Em seguida serão elaborados os índices de vulnerabilidade pela técnica AHP (Analytic Hierarchy Process). Na terceira etapa será utilizado as RNA's com o intuito de provável melhoramento da consistência desses dados, sendo aplicada as Redes neurais multicamadas e o algoritmo *backpropagation*. As RNAs foram criadas através da

rotina NNTOOL do Matlab. Essas rotinas permitem a configuração da rede e variação das funções de ativação. Com o intuito de estabelecer uma relação mais assertiva foi ainda obtida informações de ponderações com 5 especialistas locais para comparação com os dados obtidos com a técnica proposta por Ross (1994), conseguindo assim uma calibração melhor dos índices obtidos, como apresentado na etapa quatro (Figura 9), e ao final foi realizada uma análise estatística utilizando os métodos do Qui-Quadrado e Kruskall-Wallis. Vale ressaltar que foram testadas três funções de ativação (hardline, logsig e sigmoidal) implementadas pela rotina NNTOOL, após a rotina de aprendizagem das RNA's, foi escolhido às funções que se adaptaram melhor a rede, chegando a um produto específico em cada método proposto anteriormente. Finalizando com a quinta etapa, a comparação dos resultados alcançados.

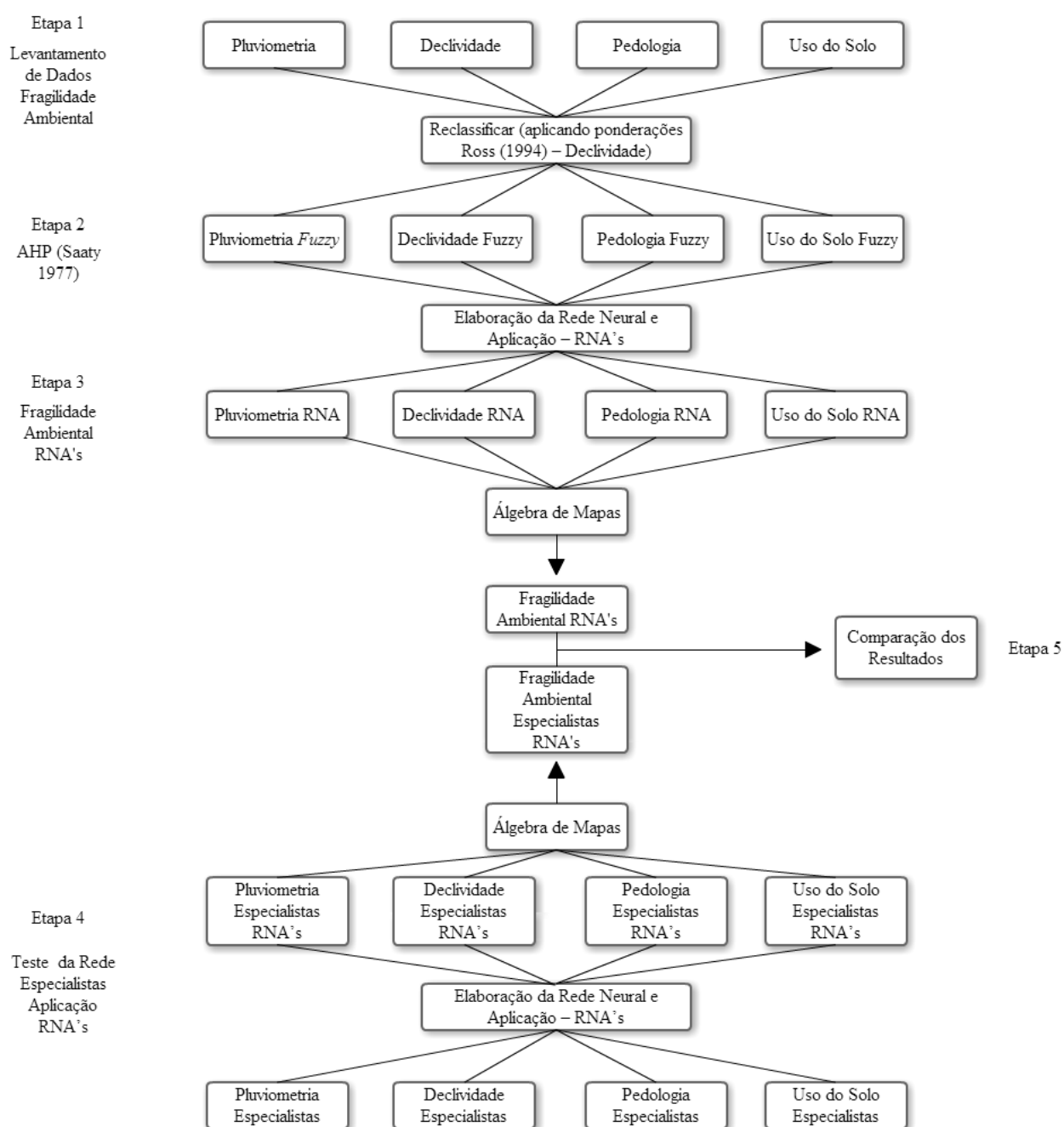


Figura 9 - Esquema de Apresentação dos Processos Metodológicos

Fonte: Autor (2015)

3.2.1. Aquisição dos dados

a) Dados de declividade

Os dados referentes à declividade foram obtidos através dos dados topográficos provenientes do projeto Topodata (2009), coletados em uma escala de referência de 1:100.000 e tratadas de acordo com a metodologia do INPE (2011) chegando a escala de 1:75.000, assim sendo possível a aquisição de curvas de nível com equidistância de 20 em 20 metros, com resolução espacial de 15 metros. Esses dados são disponibilizados em formato vetorial, na forma de arquivos com extensão shp, compatível com sistemas SIG como ArcGis, QGis e outros.

Segundo o INPE (2011), no site oficial do projeto, o Topodata oferece o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM disponibilizados pelo USGS na rede mundial de computadores. O Topodata teve início de suas atividades no ano de 2008, processando dados que foram revisados várias vezes com o intuito de aprimorar os dados coletados. Essas informações inicialmente disponibilizadas seguiram as opções e especificações constantes associadas ao guia do usuário do Topodata, mas problemas foram identificados entre folhas e a grande demanda desses dados. Há ainda a ferramenta online através do qual os dados são disponibilizados. Nela é possível obter dados vetoriais de todo território brasileiro.

Com o processo de gerar as curvas de nível e da criação do arquivo TIN, que consiste em método de estruturação dos dados para criação de uma superfície a partir de pontos espaçados irregularmente, sem necessariamente interpolar pontos intermediários, e posteriormente foi elaborado um mapa de declividade para analisar as áreas de menor e maior declividade e complementar o estudo. As classes da declividade foram baseadas na metodologia de Ross (1994) conforme apresentado na Figura 10 e Tabela 8.

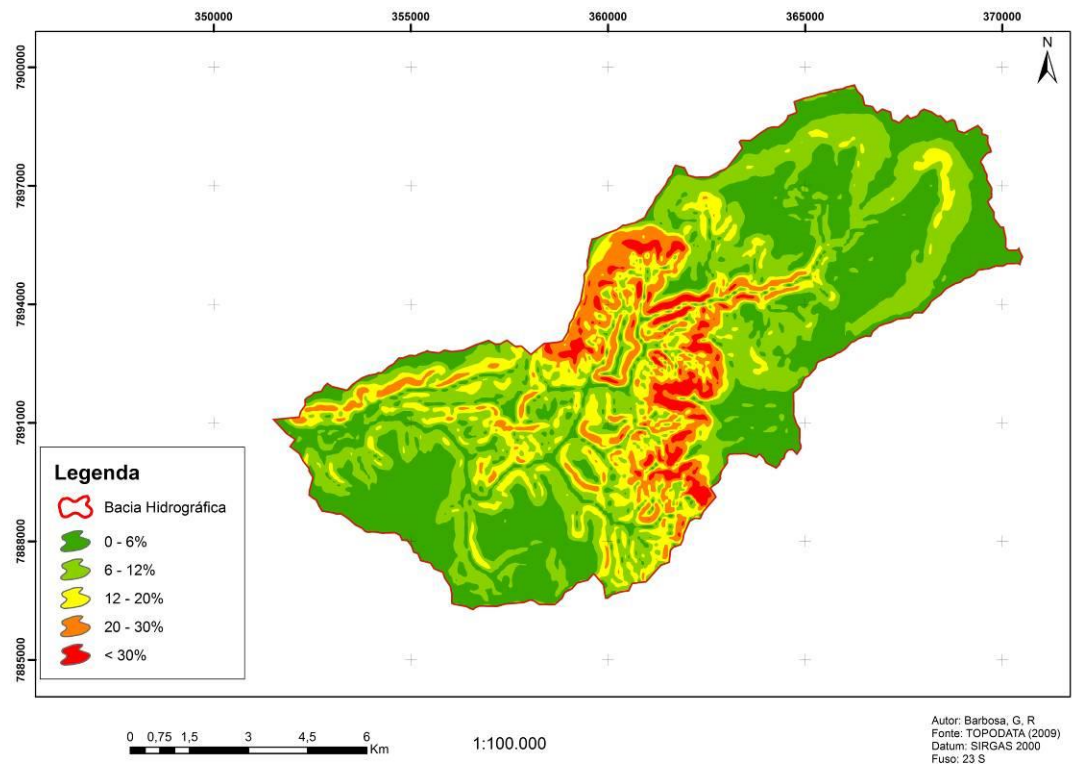


Figura 10 - Imagem do Mapa de Declividade

Tabela 8 - Classes de Declividade	
Classes de declividade	Declividade %
Plano	Até 6%
Suave Ondulado	6-12%
Ondulado	12-20%
Forte Ondulado	20-30%
Montanhoso	< 30%

Fonte: Ross (1994)

b) Dados de Pedologia

Os dados referentes aos tipos de solo da área estudada (Figuras 11) foram obtidos através de uma base de dados pré-determinada junto ao novo sistema brasileiro de classificação da EMBRAPA (1999) e publicado pelo IBGE (2001).

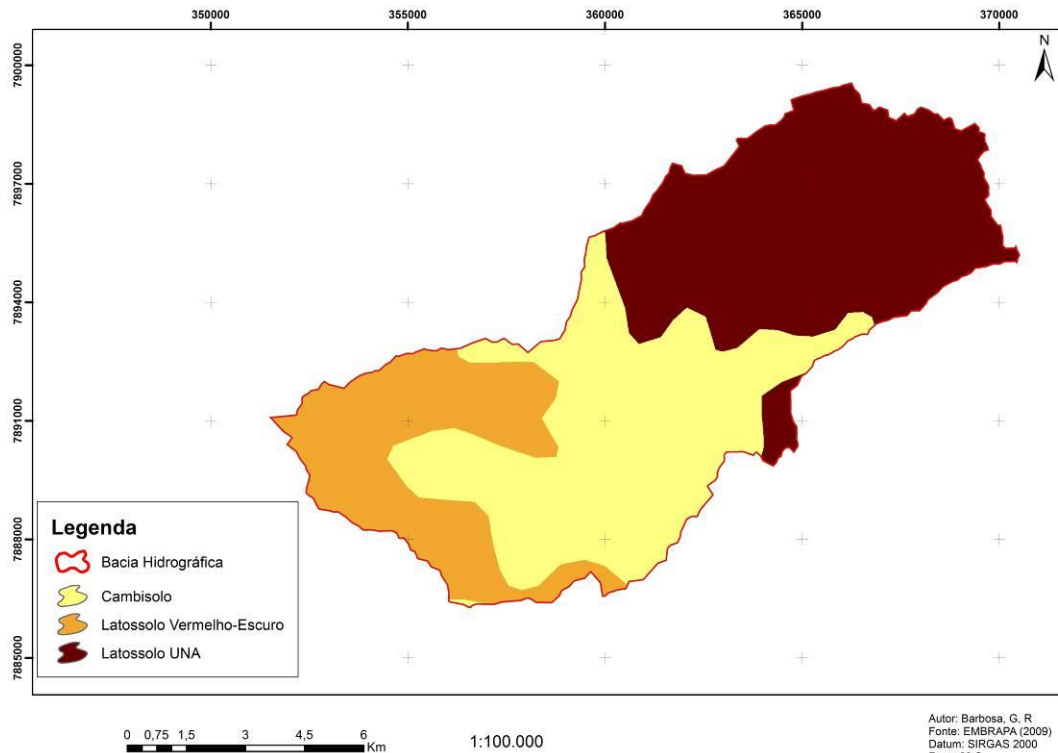


Figura 11 - Imagem do Mapa de Pedológico

De acordo com EMBRAPA (1999) o Cambissolo possui condições físicas desfavoráveis à estabilidade, as quais, aliadas a relevos ondulados ou montanhosos, não favorecem sua utilização com as mais diversas culturas climaticamente adaptadas à região. Também de acordo com EMBRAPA (1999) o Latossolo constituído por material mineral apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura. Na bacia escolhida para o estudo foi encontrada dois tipos de Latossolo, que são: Latossolo UNA e Latossolo Vermelho Escuro.

c) Dados de Pluviosidade

O mapa de pluviometria foi elaborado de acordo com os levantamentos históricos meteorológicos sobre as chuvas dos últimos 30 anos (mm) disponíveis no banco de dados da ANA (2015), apresentado na tabela 9.

Tabela 9- Estações Pluviométricas

<i>Município</i>	<i>ID (ANA)</i>	<i>X (UTM)</i>	<i>Y (UTM)</i>	<i>Precipitação (mm)</i>
Carmo do Paranaíba	1946022	363.165,83	7.898.667,10	1410
Guimarânia	1846004	310.333,77	7.917.020,68	1536
Rio Paranaíba	1946013	367.503,97	7.880.990,54	1305
Serra do Salitre	1946008	323.276,66	7.886.152,83	1615
Tiros	1845004	305.063,82	7.916.966,49	1589
Varjão de Minas	1846028	392.236,76	7.969.682,55	1368

Fonte: ANA (2015).

Organização: Autor (2015)

A planilha de dados tabelados está composta de informações referentes às coordenadas geográficas das estações: Carmo do Paranaíba, Guimarânia, Rio Paranaíba, Serra do Salitre, Tiros e Varjão de Minas junto com a média anual de chuvas de cada uma em 30 anos. Com o processo de interpolação no SIG pode-se gerar o mapa de precipitação volumétrica anual. O procedimento realizado para a elaboração do mapa de precipitação pode ser dado por duas etapas: a organização dos dados das estações climatológicas, adicionando esses dados no software, seguido da interpolação dos dados (Figura 12).

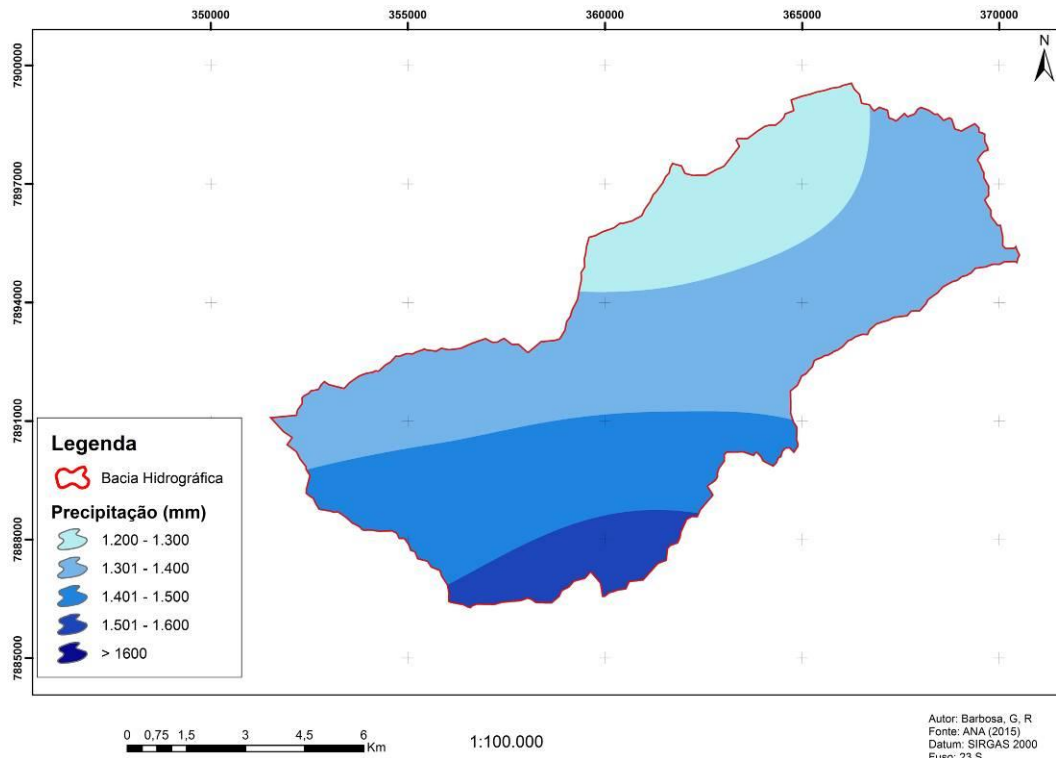


Figura 12 - Imagem do Mapa de Precipitação

d) Dados de Uso do Solo

O mapa de uso e ocupação foi elaborado a partir da classificação supervisionada da imagem pancromática, que é caracterizada pela fusão de três bandas do satélite LandSat 8, obtidas no período seco do ano. As imagens apresentam resolução espacial de 15 metros, possuem cinco bandas espectrais, sendo 3 bandas na região do visível (440 - 685 μm), a banda Red-Edge (690 - 730 μm) e uma banda no infravermelho próximo (760 - 850 μm) (SCHUSTER et al., 2010). A imagem recobre 100% da área de estudo.

As imagens foram projetadas no sistema UTM, DATUM SIRGAS 2000, fuso 23 sul. As correções geométricas foram efetuadas em duas etapas. Inicialmente a imagem foi corrigida utilizando Pontos de Controle Terrestre (PCT's). A análise estatística de erro médio quadrático (RMS) foi utilizada para a visualização da exatidão de cada PCT. Os pontos de menor exatidão, que apresentaram os maiores valores de RMS, foram retirados até alcançar o erro máximo de 2,5m, correspondente à metade da resolução espacial da imagem. Em seguida, a imagem foi corrigida utilizando a ferramenta Autoregistration, executada no software ArcGis 10.2.1, processos representados na Figura 13.

Foram estabelecidas cinco classes que consistiram em: Solo Exposto, Água, Vegetação Nativa, Pasto e Culturas. Essa nomenclatura foi observada no levantamento de Ross (1994). O método utilizado para obtenção dos índices foi o de “Máxima Verossimilhança”.

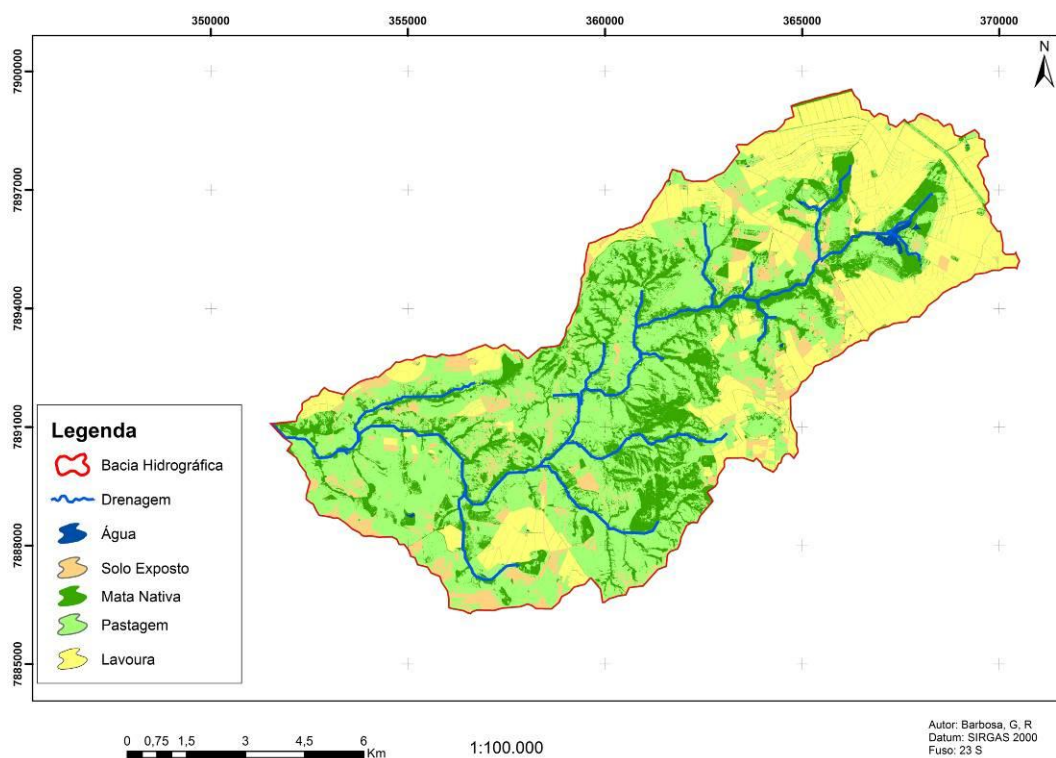


Figura 13 - Imagem do Mapa de Uso do Solo

Como resultado da classificação multiespectral foram obtidos as classes e área apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Classes do uso e ocupação do solo.

<i>Uso e Ocupação do Solo</i>		
Classes	Percentual (%)	Área (ha)
Solo Exposto	8,43%	95,1
Água	0,31%	3,5
Vegetação Nativa	20,11%	227,1
Pastagem	46,43%	524,6
Culturas	24,73%	279,7

Fonte: Autor (2015)

3.3- Modelagem por AHP e RNA

3.3.1- Modelo de Vulnerabilidade com AHP de Ross baseado em Declividade

Esse modelo de classificação a vulnerabilidade ambiental determina quatro variáveis, no qual o primeiro que é a declividade é responsável pela deliberação do grau de vulnerabilidade, as demais variáveis (solo, uso do solo e clima) definem uma hierarquização por meio de seus coeficientes de vulnerabilidade.

As variáveis espaciais para a determinação das áreas de vulnerabilidade ambiental são classificadas por Ross (1994) em cinco categorias hierárquicas. Em seguida, conforme os temas selecionados, quatro grandes categorias hierárquicas foram adotadas para a produção final da carta: muito fraca, fraca, média, forte e muito forte. Para cada tema selecionado utilizou-se a classificação conforme Ross (1994) propôs em seus estudos. Para o tema declividade do terreno, utilizaram-se os seguintes intervalos de classe e os valores de vulnerabilidade (Tabela 11).

Tabela 11 - Escalas de Vulnerabilidade Proposta por Ross (1994)

<i>Classes de Vulnerabilidade</i>	<i>Declividade (%)</i>	<i>Tipos de Solo</i>	<i>Uso do Solo</i>	<i>Pluviometria (mm)</i>
Muito fraca	Até 6%	Latossolo Vermelho	Mata Nativa	1300 - 1360
		Escuro		
Fraca	6-12%	Latossolo UMA	Culturas	1361 – 1420
Média	12-20%	Cambissolo	Água	1421 – 1479
Forte	20-30%	-	Pastagem	1480 - 1535
Muito Forte	< 30%	-	Solo	1536 - 1600
			Exposto	

Fonte: Autor (2015)

Para a hierarquização da variável solo foram levados em consideração os tipos de solo encontrados na área de estudo. Assim, os tipos de solo são classificados conforme seu grau de vulnerabilidade, de acordo com as características de texturas, estruturas, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade/espessura dos horizontes.

Para a análise da proteção exercida pela cobertura vegetal/uso do solo foram estabelecidos graus de proteção baseados nos critérios propostos por Ross (1994). Para a variável clima nessa metodologia foi analisada a distribuição e intensidade das chuvas ao longo do ano, por serem fatores decisivos no processo de intemperismo das rochas e formação dos solos.

Para a elaboração da carta de vulnerabilidade foi utilizada a técnica de álgebra de mapas em um SIG, na qual foram associados os mapas gerados anteriormente, sendo eles: declividade (dominante), uso do solo, tipo do solo e precipitação. A técnica de Análise Hierárquica (AHP) foi utilizada para a classificação e a comparação par a par. Para a representação de forma mais próxima às condições encontradas nos estudos realizados nos mapas gerados do córrego do Fundo na cidade de Carmo do Paranaíba - MG, foi realizada a ponderação dos dados e a técnica escolhido foi a AHP proposto por Saaty (1977).

As comparações entre os atributos e as alternativas são registradas em matrizes na forma de frações entre 1/9 e 9. Cada matriz é avaliada pelo seu autovalor para verificar a coerência dos julgamentos (Tabela 12). Esse procedimento gera uma "razão de coerência" que será igual a 1 se todos os julgamentos forem coerentes entre si.

Tabela 12 - Graus de Vulnerabilidade / estabilidade

<i>Grau de vulnerabilidade</i>	<i>Intervalo de classe</i>
Muito fraca	1
Fraca	2
Média	3
Forte	4
Muito Forte	5

Fonte: Ross (1994)

Para cada fator que influencia no mapa de vulnerabilidade, foi definida uma nota (peso) de acordo com o grau de relevância, como mostra a tabela 13 abaixo:

Tabela 13 - Notas estabelecidas para a declividade.

<i>Notas</i>	<i>Declividade (%)</i>	<i>Tipos de Solo</i>	<i>Uso do Solo</i>	<i>Pluviometria (mm)</i>
1	Até 6%	Latossolo Vermelho Escuro	Mata Nativa	1300 - 1360
2	6-12%	Latossolo UMA	Culturas	1361 – 1420
3	12-20%	Cambissolo	Água	1421 – 1479
4	20-30%	-	Pastagem	1480 - 1535
5	< 30%	-	Solo Exposto	1536 - 1600

Fonte: Autor (2015)

Com o as notas definidas para cada tipo de classe em relação aos critérios usados na técnica, todos os quatro mapas em formato matricial (raster) foram reclassificados pelo ArcGIS 10.2 individualmente.

Após a obtenção dos valores de importância relativa, é elaborado o cálculo, dividindo cada elemento pela somatória dos elementos da coluna a que ele pertence e fazendo-se uma média entre as colunas, logo determinando o fator de cada peso, como demonstrado abaixo nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Matriz de comparação pareada

<i>Fatores</i>	<i>Precipitação</i>	<i>Tipo de Solo</i>	<i>Uso Do Solo</i>	<i>Declividade</i>
Precipitação	1	1/F2	1/F3	1/F4
Tipo de Solo	F2	1	1/F2	1/F3
Uso Do Solo	F3	F2	1	1/F2
Declividade	F4	F3	F2	1

Fonte: Autor (2015)

Tabela 15 - Determinação dos pesos

<i>Fatores</i>	<i>Precipitação</i>	<i>Tipo de Solo</i>	<i>Uso Do Solo</i>	<i>Declividade</i>
Precipitação	F1/∑Coluna1	F1/∑Coluna2	F1/∑Coluna3	F1/∑Coluna4
Tipo de Solo	F2/∑Coluna1	F2/∑Coluna2	F2/∑Coluna3	F2/∑Coluna4
Uso Do Solo	F3/∑Coluna1	F3/∑Coluna2	F3/∑Coluna3	F3/∑Coluna4
Declividade	F4/∑Coluna1	F4/∑Coluna2	F4/∑Coluna3	F4/∑Coluna4

Fonte: Autor (2015)

A determinação dos pesos estatísticos (P_n) de cada classe é encontrada através da média aritmética entre os valores resultantes de cada linha, dividido pelo número de colunas como apresentado na Tabela 15.

3.2.3- *Elaboração Questionário*

Buscando obter um conjunto de treinamento a ser submetido na rede neural, foram utilizados cinco especialistas que não possuem conhecimento prévio da região em questão, para aplicação de um questionário em forma de pesquisa. Essas perguntas serviram para atribuir uma escala de notas e ponderações das variáveis do trabalho.

Para aplicação desse questionário foram utilizados métodos propostos por Spörl (2001), esse método trabalha cenários com combinação de valores para elaboração de uma avaliação global. Após o resultado, essa comparação foi aplicada à técnica de Saaty (1977), conforme apresentado em Castro (1998) para conseguir a escala numérica para alimentar a entrada de dados na rede. O questionário é apresentado no apêndice A.

3.2.4- *Redes Neurais Artificiais (RNA's)*

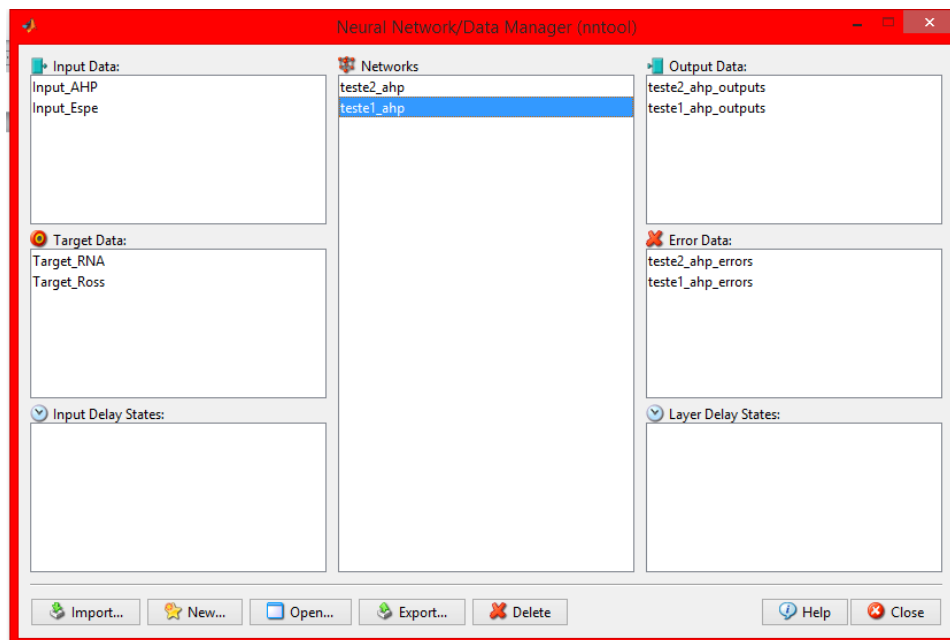
O método das RNA's possui um mecanismo que utiliza o reconhecimento de padrões de avaliação com técnicas de inteligência artificial (IA). A RNA possui a capacidade de reconhecer padrões, extrair irregularidades e excluir relações em um conjunto de dados aparentemente desconexos, também possui a habilidade de trabalhar com dados com alto nível de ruído, imperfeitos e incompletos. É importante comentar que existem inúmeros tipos de redes neurais e que cada uma possui suas particularidades e apresenta maneiras diferentes de receber conhecimento para seu treinamento, assim a escolha da rede vai depender do tamanho da rede, do tipo de dados e do tipo do problema.

Para a inferência por redes neurais utilizou-se a ferramenta do Matlab NNTOOL. Essa ferramenta trabalha em conjunto com dois conjuntos de padrões, um de treinamento e outro de validação. O procedimento para o treinamento foi a estabilização da curva do erro médio quadrático das amostras de treinamento e de validação.

A Figura 14 apresenta as telas da ferramenta NNTOOL para criação de uma rede multicamadas. A figura 14a apresenta a tela de interação com os resultados da rede. Nela o usuário pode fornecer os dados de entrada como treinamento da rede, ou como teste, ou ainda como dados adicionais para verificação da qualidade dos pesos da rede. Além disso, nessa tela que são fornecidos os parâmetros básicos da rede como critério de parada e número máximo de épocas (interações) do sistema.

Na Figura 14b o usuário efetivamente configura os parâmetros da rede como número de camadas, número de neurônios por camada, limites do universo de dados e as funções de pertinência ou ativação. Nessa janela as variáveis são correlacionadas para a criação da rede.

(a)



(b)

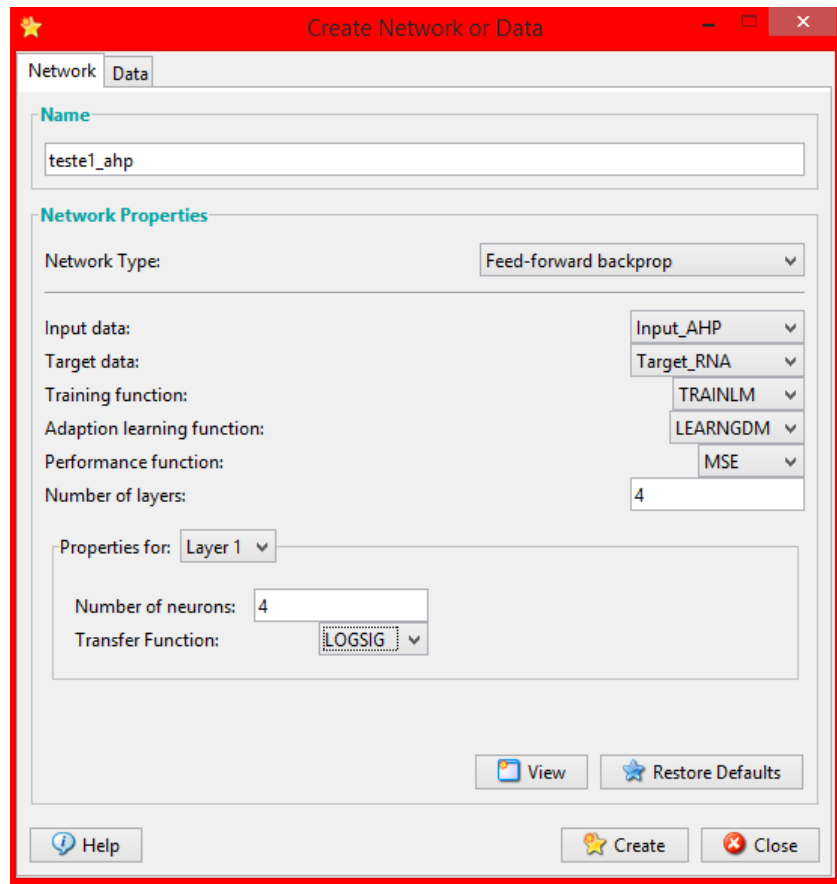


Figura 14 - Telas de Ferramenta NNTOOLS

A criação das redes inicia-se com o módulo de fuzzificação, que consiste na modelagem matemática para a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos fuzzy. É nesse módulo que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos que representam os dados de entrada e deve ser associado um conjunto fuzzy por uma função de pertinência ou de ativação. Em seguida, foi elaborado o módulo da base de regras que é o que constitui o núcleo do sistema. É nesse módulo onde se “guardam” as variáveis e suas classificações linguísticas.

Em seguida o sistema ativa o módulo de inferência, em que se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação fuzzy e realiza e modela a base de regras. É desse módulo que depende o sucesso do sistema fuzzy que fornecerá a saída (controle) fuzzy a ser adotada pelo controlador a partir de cada entrada fuzzy. Finaliza-se a

aplicação com o módulo de defuzzificação que traduz o estado da variável de saída fuzzy para um valor numérico.

Castro (1998) propõe que a definição da quantidade de neurônios na camada oculta tome-se como partida uma regra empírica a qual recomenda que esse número esteja entre o número de dados de entradas e dados de saída, ou seja, em uma rede com cinco dados de entrada e um dado de saída será necessário testar 4, 3 e 2 camadas para se alcançar o valor de menor erro. Os autores citados acima trabalharam com essa relação proposta do autor, chegando a resultados satisfatórios em seus treinamentos de rede.

Essa pesquisa encontrou alguns trabalhos relacionados que variam o número de camadas ocultas. Ao analisar a Tabela 16 Zell (1995) trabalho com Deslizamento de Encostas em ambientes Urbanos e trabalhou com 6 camadas, Spörl (2000) representou muito bem os cenários de Fragilidade Ambiental e trabalhou com 2, já Azevedo (2000) também trabalho com 2 camadas Índice de potencial de viagem, Zanetti (2007) estudou Evapotranspiração Potencial e utilizou 8 camadas e por último Chagas (2008) estudou degradação de pastagem com a implementação de 6 camadas intermediárias.

Tabela 16 - Quadro de autores que utilizaram RNA's

<i>Autor</i>	<i>Números de Camadas Escondidas</i>	<i>Ano</i>	<i>Trabalho</i>
Zell	6	1995	Deslizamento de Encosta
Spörl	2	2000	Fragilidade Ambiental
Azevedo	2	2000	Índice de potencial de viagem
Zanetti	8	2007	Evapotranspiração
Chagas	6	2008	Degradação em Pastagens

Fonte: Autor (2015)

Baseado nessas considerações, esta pesquisa propõe a utilização da rede apresentada na Figura 15:

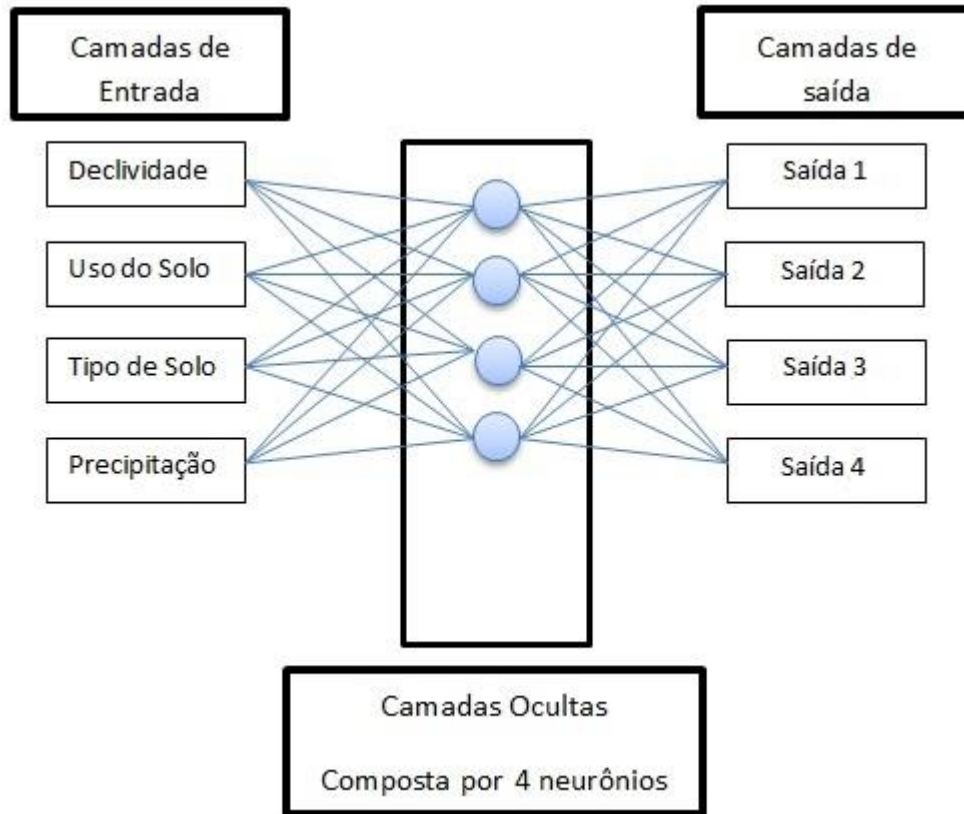


Figura 15 - Estrutura geral da arquitetura da rede neural

Foram apresentados aos especialistas cinco cenários diferentes usando como base a relação de quatro camadas de entrada indicadas na arquitetura da RNA. No formulário desta pesquisa os especialistas da área ambiental responderam sobre a importância relativa entre diversas combinações de dados para análise de vulnerabilidade ambiental e avaliaram suas opiniões na escala da AHP. Essas informações foram posteriormente utilizadas nos testes com as diferentes metodologias.

3.2.5- Método Kruskal-Wallis

O controle de qualidade para averiguação das redes será utilizado o de Kruskal-Wallis (1952), o qual consiste em na aplicação quando estão em comparação três ou mais grupos independentes e a variável deve ser de mensuração ordinal.

Para tanto foi utilizado o teste Kruskal- Wallis, com o programa Matlab. Segundo Schmidt (2012), este teste é uma versão não-paramétrica da ANOVA de um fator que substitui a estatística F dos testes de Anova por qui-quadrado. Este teste compara as medianas de duas ou mais amostras com distribuição não normal, e retorna o valor p para a hipótese (nula) de que todas as amostras são retiradas da mesma população ou populações com a mesma distribuição. O valor de p mede a significância do resultado pela distribuição do qui-quadrado. Desta forma, o teste avalia a hipótese de que todas as amostras vêm de populações que têm a mesma mediana, contra a alternativa de que as medianas não são todas iguais.

Segundo Kruskall e Wallis (1952) os valores de p significativos ficam entre 0,05 e 0,001. Valores acima, são não significativos ao passo que valores abaixo deste limite lançam dúvidas em relação à hipótese nula.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões

Após a elaboração dos temas básicos (Pedologia, Uso do Solo, Precipitação e Declividade), foram confeccionadas as cartas de vulnerabilidade ambiental em três situações diferentes.

No primeiro momento foi elaborado o mapa pautado na técnica AHP (vinculado ao método proposto por Ross (1994)), na qual, foi utilizado o tema declividade como fator predominante para interpolação dos dados.

Em um segundo momento foi elaborado o mapa de vulnerabilidade ambiental (Caso 1) utilizando o conhecimento prévio de cinco especialistas levantado com o auxílio do questionário (apêndice A), assim elaborando uma rede, na qual, foi treinada utilizando como padrão os pesos alcançados com a técnica AHP, vinculados aos resultados alcançados pelos especialistas, findando com um teste de homogeneidade para averiguação dos resultados finais.

Posteriormente foi realizado um refinamento dos dados apresentados anteriormente. Para esse processo foram utilizados os resultados obtidos no cenário anterior (Caso 1) e e aplicada novamente com os valores obtidos no Caso 2. Finalizando esse processo as diferenças foram analisadas com o método Kruskal-Wallis para averiguar a consistência dos resultados obtidos.

4.1- Vulnerabilidade Ambiental – Ponderações AHP

O primeiro passo a ser elaborado foi o caso AHP, foi inicialmente a geração dos pesos (Tabela 17) do acordo com metodologia proposta por Ross (1994), assim chegando aos resultados apresentado abaixo:

Tabela 17 - Determinação dos pesos

<i>Fatores</i>	<i>Pesos</i>
Precipitação	0,0569
Tipo de Solo	0,1219
Uso do solo	0,2633
Declividade	0,5579

Fonte: Autor (2015)

Considerando a escala de 0,90 de valores IR para matrizes de ordem n (tabela 18), chega-se ao RC de 0,032441.

Tabela 18 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n

<i>n</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
IR	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32

Fonte: Autor (2015)

Esse valor é menor de 0,1 (10%) conforme indica Saaty (1977). Então se passa ao cálculo do índice de consistência (IC), que pode ser calculado pela Equação 2, resultando em um valor de 0,02920. Após esse processo estatístico de elaboração dos pesos e o cruzamento das variáveis de Precipitação, Declividade, Pedologia e Uso do Solo foi elaborado a Figura 16.

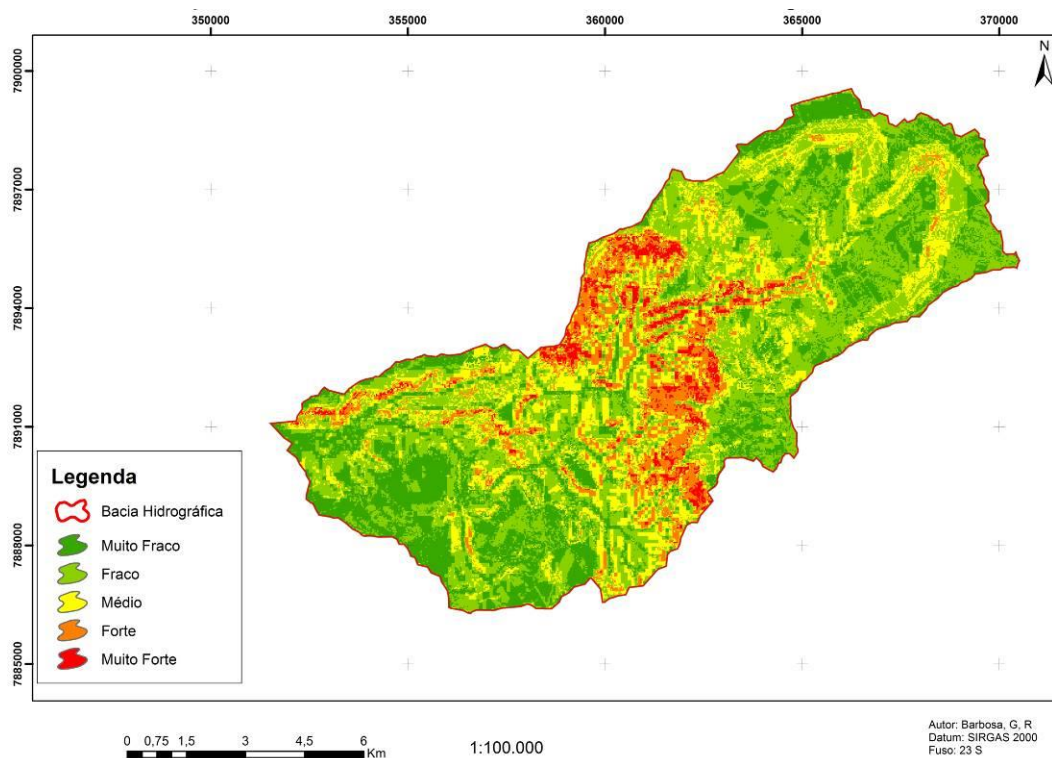


Figura 16 - Imagem do Mapa de Vulnerabilidade Ambiental AHP da Bacia do Córrego do Fundo.

A Figura 17 demonstra que no modelo proposto utilizando a técnica AHP, 65% da bacia do córrego do Fundo está classificado como “Muito Fraco” e “Fraco” grau vulnerabilidade ambiental e sua localização está situada nas porções norte e sul da bacia. Também é observado que as classificações “Forte” e “Muito e Forte” representa somente 13% da área da bacia, na qual, está situada principalmente na porção central na área de estudo.

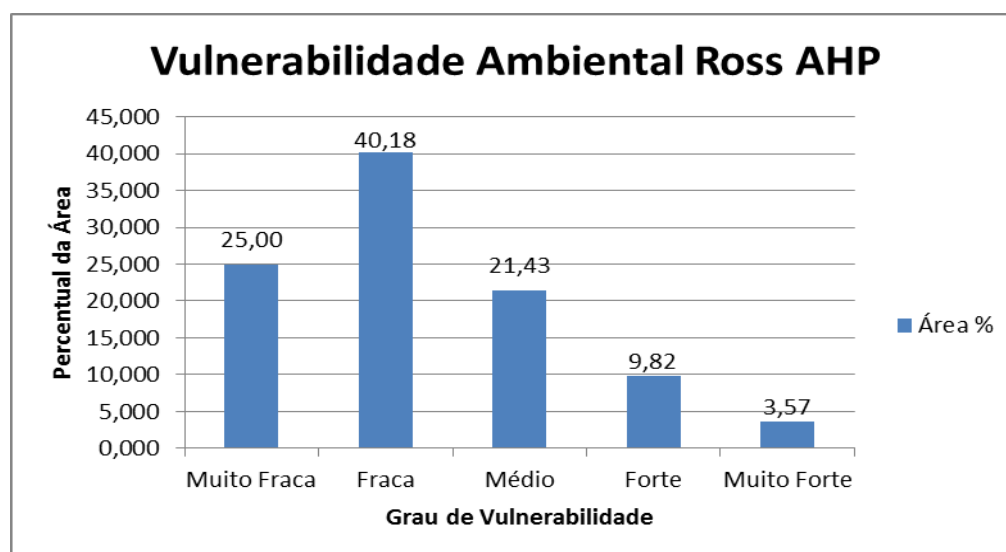


Figura 17 - Percentual de Áreas Técnica AHP

Fonte: Autor (2015)

Isso acontece porque esse modelo adota o agrupamento dos índices das variáveis, apontando a “Declividade” como variável principal. Nesse modelo a primeira variável associada numericamente (ponderação de matrizes) determina o grau de vulnerabilidade, enquanto que as demais variáveis se hierarquizam em pequenos detalhes da vulnerabilidade. Sendo assim, nesse modelo a declividade tem uma importância muito maior que na determinação dos graus de vulnerabilidade ambiental. Essa importância é classificada de acordo com os pesos atribuídos para cada variável e o desconhecimento dessa relação entre as variáveis gera uma fonte de inconsistência no resultado final do modelo proposto.

Essa problemática de ajustar um modelo de maneira a correlacionar com os eventos complexos da natureza (variáveis do modelo) é o principal fator responsável pela subjetividade. Com o intuito de amenizar esse erro foram propostos os dois cenários a seguir.

4.2 – Vulnerabilidade Ambiental – Ponderações Redes Neurais

4.2.1- Caso 1

Para o início das ponderações do Caso 1, cinco especialistas responderam as simulações apresentadas através de um questionário (Apêndice A) desenvolvido para este trabalho. Através dessas respostas os especialistas avaliaram cenários comparativos entre as variáveis de ponderação da vulnerabilidade. Nesse questionário os especialistas deveriam indicar qual alternativa (variável) é mais vulnerável naquele determinado cenário proposto. Diante das respostas dos especialistas foi aplicada a técnica AHP para cada especialista e suas respostas transformadas na matriz pareada com base nos pesos propostos pelos mesmos, como apresentado na Tabela 19. Os dados obtidos pelos entrevistados serão submetidos posteriormente a um teste de homogeneidade (Qui-Quadrado) para determinar o grau de homogeneidade entre si.

Tabela 19 - Ponderação obtida a partir dos especialistas

<i>Especialistas/Pesos</i>	<i>Precipitação</i>	<i>Tipo de Solo</i>	<i>Uso do Solo</i>	<i>Declividade</i>
1	0,234	0,195	0,256	0,313
2	0,101	0,199	0,317	0,381
3	0,250	0,236	0,277	0,236
4	0,222	0,224	0,277	0,275
5	0,373	0,303	0,164	0,158
Pesos AHP	0,056	0,121	0,263	0,557

Fonte: Autor (2015)

Dessa forma, esses dados foram utilizados como base comparativa para as variáveis de entrada, sendo assim, responsável pela base de dados aplicada no treinamento das RNAs. Durante o treino, as redes armazenam vários exemplos de como cada especialista avalia o grau de interação entre variáveis, apontando quais as maiores e menores variações de dados quanto a vulnerabilidade ambiental.

Essas e outras informações também puderam ser observadas (Figura 18) ao longo do treinamento das redes, pois o software usado apresenta uma interface de operação bastante visual, apresentando de forma bem clara o acompanhamento de todas as variáveis envolvidas na dinâmica sistêmica das RNAs. Essas informações eram:

- Taxa de aprendizagem
- Momento
- Tolerância número de exemplos de interação

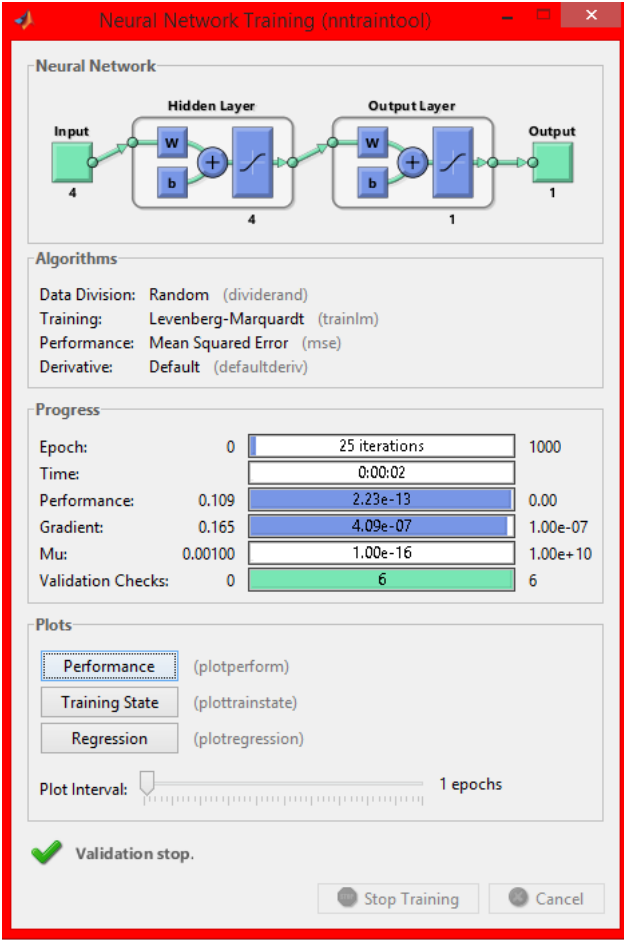


Figura 18 - Interface do NNTOOLS (Matlab)

Os dados apresentados anteriormente foram submetidos a uma rede composta por quatro camadas intermediárias e quatro neurônios, ressaltando que foram testadas outras configurações de redes, mas o formato 4x4 apresentado anteriormente foi o que obteve maior convergência do processamento da rede. Para cada rede foi utilizada três configurações diferentes, quanto à função de ativação da rede. (Tabela 20)

Tabela 20 - Resultado da Rede Caso 1

<i>Pesos/função</i>	<i>Pesos Tang. Hipe.</i>	<i>Erro</i>	<i>Pesos Degrau</i>	<i>Erro</i>	<i>Pesos Sigmoidal</i>	<i>Erro</i>
1	0,10757	-0,05068	0,49353	-0,43664	0,065899	-0,0090089
2	0,48418	-0,36231	0,5488	-0,42692	0,1169	0,004975
3	0,54796	-0,28462	0,26335	9,92E-04	0,2197	0,043648
4	0,55789	9,13E-03	0,55788	8,33E-02	0,32463	0,23326

Fonte: Autor (2015)

Para a primeira configuração foi utilizado a função de ativação tangente hiperbólica que é caracterizada por sempre assumirem valores entre -1 e 1, cuja expressão matemática é definida pela Equação 6. Onde β é associado ao nível de inclinação da função da tangente hiperbólica em relação ao seu ponto de inflexão.

$$g(u) = \frac{1 - e^{-\beta \cdot u}}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (6)$$

Para a segunda configuração foi utilizado a função de ativação degrau que é caracterizada por assumir valores unitários positivos quando o potencial de ativação do neurônio for maior ou igual a zero, caso contrário, o resultado assumirá valores nulos. (Equação 7):

$$g(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u \geq 0 \\ 0, & \text{se } u < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Para a terceira configuração foi utilizada a função de ativação sigmoidal que é caracterizada por assumir valores reais entre 0 e 1 tendo sua expressão matemática dada pela Equação 8. Onde β é uma constante real associada ao nível de inclinação da função sigmoidal frente ao seu ponto de inclinação.

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (8)$$

Para cada rede foi utilizado um conjunto de teste. Foi averiguada a eficácia do padrão assimilado pela RNA após seu treinamento comparando o resultado que a rede forneceu a esse conjunto de entradas com as saídas conhecidas, ou seja, o conjunto de teste. Esta comparação entre os valores esperados e os valores calculados resultou no coeficiente de correlação, indicado para verificar a eficiência da rede no reconhecimento de padrões de avaliação dos especialistas.

O coeficiente de correlação é a medida de associação entre duas variáveis a partir de uma série de observação (Tabela 21). Determinar o grau de precisão do modelo pode indicar correlação positiva ($R=1$), negativa ($R= -1$) ou não associação a dados existentes ($R=0$). Na

correlação positiva à medida que o valor calculado cresce o valor esperado também cresce, na correlação negativa à medida que esses valores crescem os esperados decrescem. Quanto maior o valor de “R” mais forte é a associação entre esses valores.

Tabela 21 - Valor de “R” Coeficiente de Correlação e suas Interpretações

<i>Valor de “R” Coeficiente de Correlação</i>	<i>Interpretação</i>
0,0 a 0,19	Correlação muito fraca
0,2 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: SHIMAKURA (2001)

Essa correlação de “R” está apresentada na Tabela 21 e na Figura 19, na qual, a função Degrau apresentou o valor 0,92655, indicando uma “correlação muito forte” (Tabela 22) e a função Tangente Hiperbólica apontou o valor -0,41484 ressaltando uma “ correlação inexistente”, com isso demonstrando o desempenho de aprendizado da rede, ou seja, quais variáveis terão maior ou menor grau de interação. Cabe ressaltar que a função Sigmoidal apresentou resultados de 0,73238 sendo considerado com uma “Correlação Forte”, também podem ser utilizadas, mas resolveu-se utilizar somente o dado de maior correlação. Essa conexão calcula a eficiência das RNAs em reconhecer o padrão de avaliação dos especialistas.

Tabela 22 - Valores de “R” Relacionados no Caso 1

<i>Função</i>	<i>Coeficiente de Correlação</i>
Tangente Hiperbólica	-0,41484
Degrau	0,92655
Sigmoidal	0,73238

Fonte: Autor (2015)

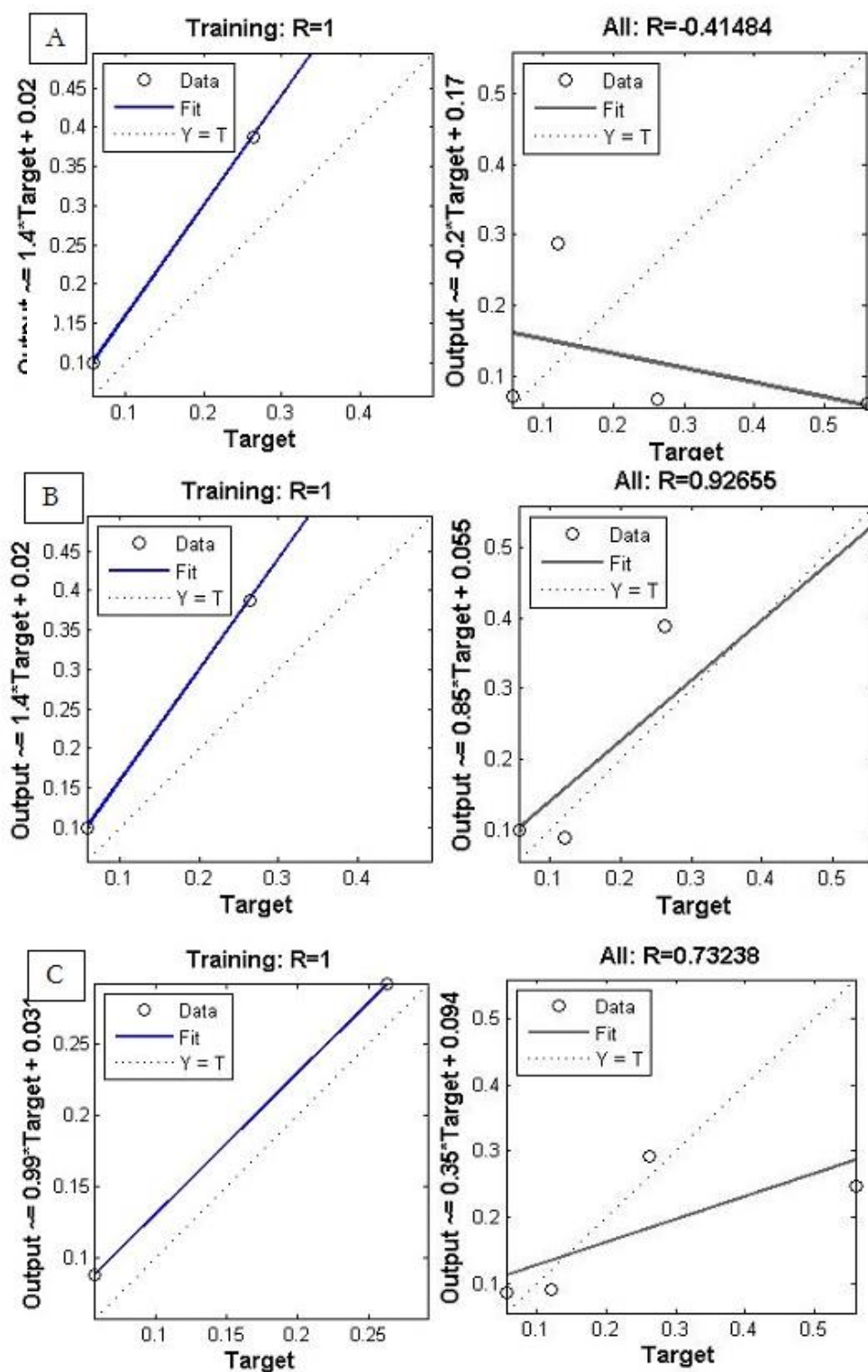


Figura 19 - Gráficos dos Coeficientes de Correlação A: Tangente Hiperbólica; B: Degrau C: Sigmoidal. Fonte: Autor (2015)

Após os testes aplicados com a ajuda das redes neurais artificiais, decidiu-se utilizar os dados obtidos com a função “Degrau” para a elaboração da álgebra de mapas, pois como já comentado anteriormente foi o que atingiu o maior fator de correlação. Para esse processo os valores obtidos no treinamento da função foram submetidos ao Software de ambiente SIG para a elaboração da álgebra de mapas, com aplicação da Formula 9 abaixo:

$$\text{Mapa de Vulnerabilidade} = D * 0,49353 + U * 0,5488 + P * 0,26335 + Pr * 0,55788 \quad (9)$$

Onde:

D: Declividade

U: Uso do Solo

P: Pedologia

Pr: Precipitação

A inserção desses valores no ambiente SIG juntamente com o auxílio da ferramenta “*Raster Calculator*” culminou no resultado no mapa de vulnerabilidade apresentada na Figura 20, e ao relacionar as feições de classe com formas geométricas obteve-se o gráfico relacionando o percentual de áreas no mapa a seguir (Figura 21).

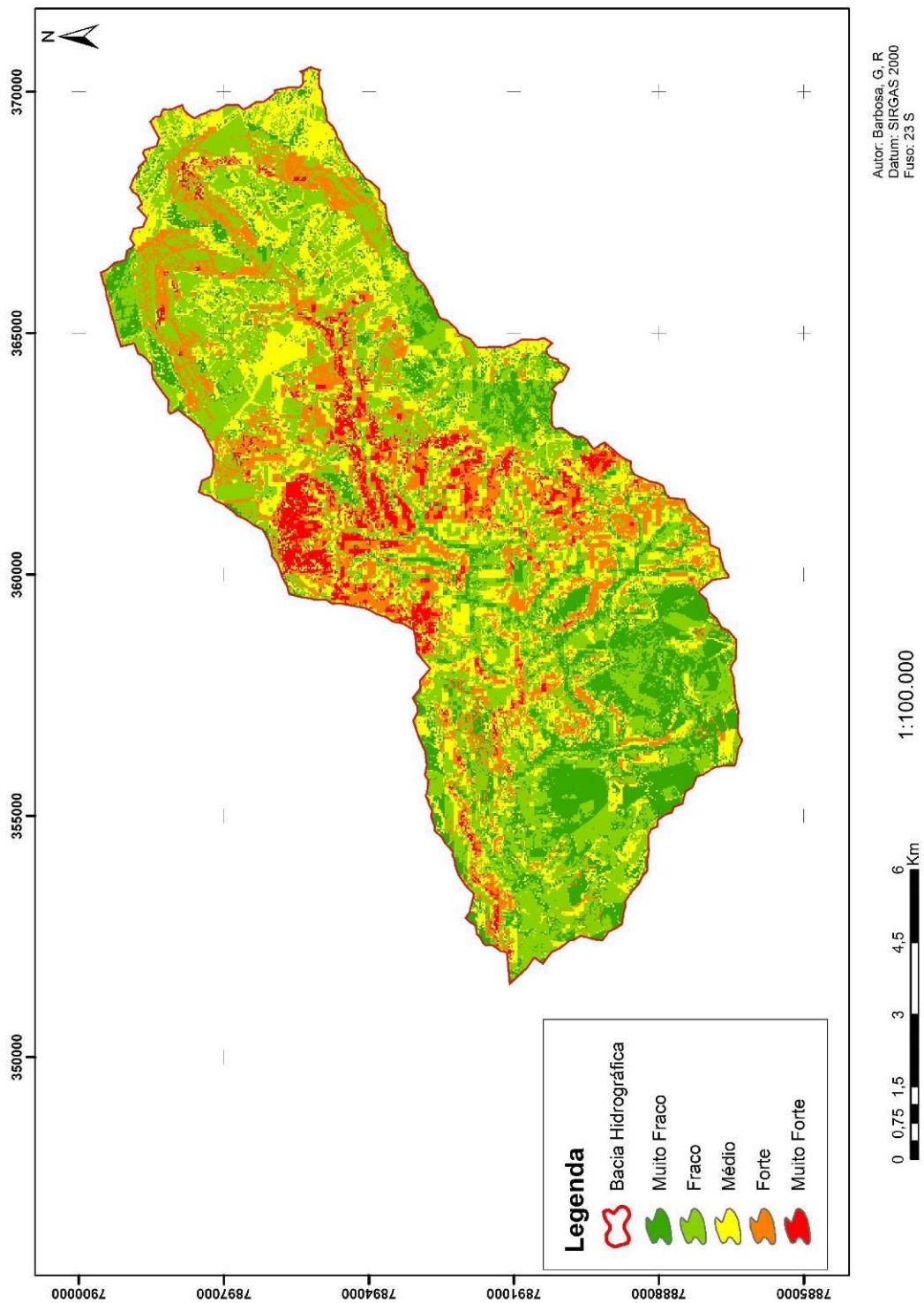


Figura 20 - Imagem do Mapa de vulnerabilidade considerando as ponderações dos especialistas (Caso 1)

Ao observar a Figura 21, nota-se que a distribuição das áreas apresentou modificações em relação à técnica AHP. Nesse cenário 59% da bacia do córrego do Fundo estão classificados como “Muito Fraco” e “Fraco” e sua distribuição apresentou pouca modificação, situando-se nas porções norte e sul da bacia (Figura 20). Também é observado que as classificações “Forte” e “Muito e Forte” representa área 21%, na qual, está situada principalmente na porção central na área de estudo e agora também apresentado com maior incidência em partes da porção norte e sul da área de estudo.

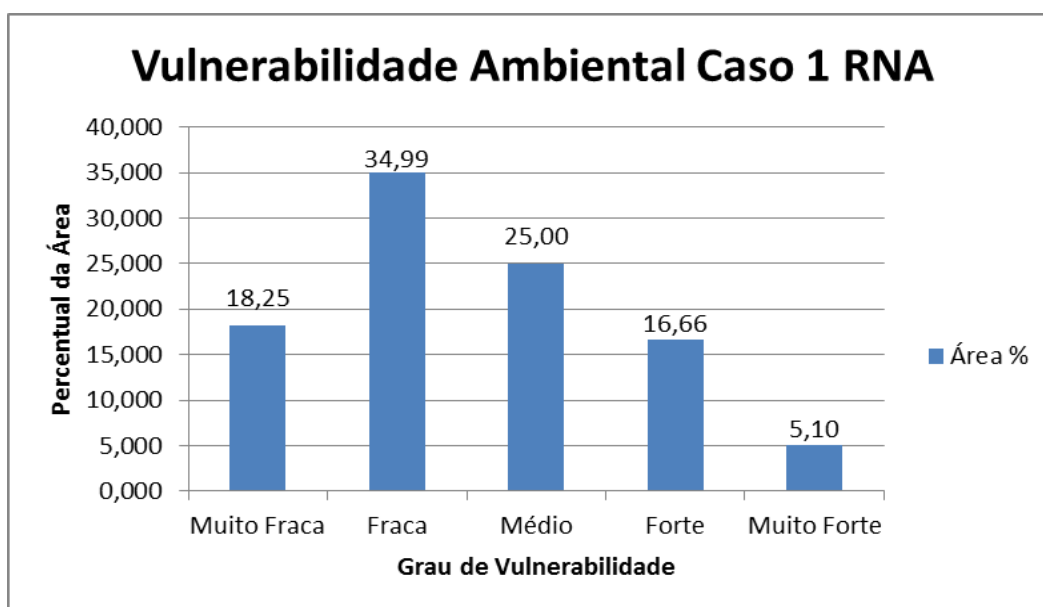


Figura 21 - Gráfico de Percentual de Áreas (Caso 1)

Fonte: Autor (2015)

4.2.2- Caso 2

Matsumoto (2011), afirma que utilizar base de dados já tratadas em novos testes é possível alcançar ponderações mais assertiva com o intuito de aumentar a correlação existente entre os dados. Embasado na ideia do autor citado anteriormente, em um segundo momento, outro cenário foi pensado (Caso 2). Utilizando os resultados do caso 1 como base de treinamento, juntamente com a matriz pareada proposta na técnica AHP. Com isso elaborou-se uma nova rede neural caracterizada pelos dados de entrada abaixo. (Tabela 23).

Tabela 23 - Matriz pareada (Dados de Entrada)

<i>FATORES</i>	<i>Precipitação</i>	<i>Tipo de Solo</i>	<i>Uso Do Solo</i>	<i>Declividade</i>
Precipitação	0,06250	0,03571	0,04411	0,08522
Tipo de Solo	0,18750	0,10714	0,07352	0,11931
Uso Do Solo	0,31250	0,32142	0,22058	0,19886
Declividade	0,43750	0,535714	0,66176	0,59659
Ponderação RNA	0,06589	0,11690	0,21970	0,32463

Fonte: Autor (2015)

Os dados utilizados para treinar o chamado “*Target*” foram os obtidos no teste anterior (caso 1), e estão expostas na tabela anteriores. Os dados foram submetidos a uma rede neural composta por uma configuração de quatro camadas intermediárias e quatro neurônios, ressaltando que foram testadas outras configurações de redes, mas o formato 4x4 foi o que obteve maior convergência do processamento da rede. Nesse caso também foram utilizadas três configurações diferentes, quanto à função de ativação da rede (Tabela 24).

Tabela 24 - Resultado da Rede (Caso 2)

<i>Pesos/função</i>	<i>Pesos</i>		<i>Pesos</i>		<i>Pesos</i>	
	<i>Tang.</i>	<i>Erro</i>	<i>Degrau</i>	<i>Erro</i>	<i>Sigmoidal</i>	<i>Erro</i>
1	0,16665	-0,10076	0,1356	-0,021732	0,087631	-0,069703
2	0,12701	-0,010106	0,070181	0,002695	0,11421	0,046719
3	0,22649	-0,006786	0,072063	-0,048017	0,26772	0,14764
4	0,21344	0,11119	0,16655	0,014457	0,31017	0,15808

Fonte: Autor (2015)

Ao observar os resultados abaixo (Tabela 25) se constatou que a função “Sigmoidal” apresentou uma “Correlação Forte” com os dados de entrada dos especialistas, sendo assim foi utilizado os valores obtidos com essa rede para a elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental (Caso 2). Vale ressaltar que a função “Degrau” apresentou no cenário anterior uma “Correlação Forte”, e agora sua correlação atingiu um grau “Muito Fraca”, obtendo um valor de 0,11271, já a função “Tangente Hiperbólica” também atingiu “Correlação Inexistente” apresentando o valor de -0,084959. Essa correlação é demonstrada na Figura 22.

Tabela 25 - Valores de “R” Relacionados (Caso 2)

<i>Função</i>	<i>Coefficiente de Correlação</i>
Tangente Hiperbólica	-0,084959
Degrau	0,11271
Sigmoidal	0,82682

Fonte: Autor (2015)

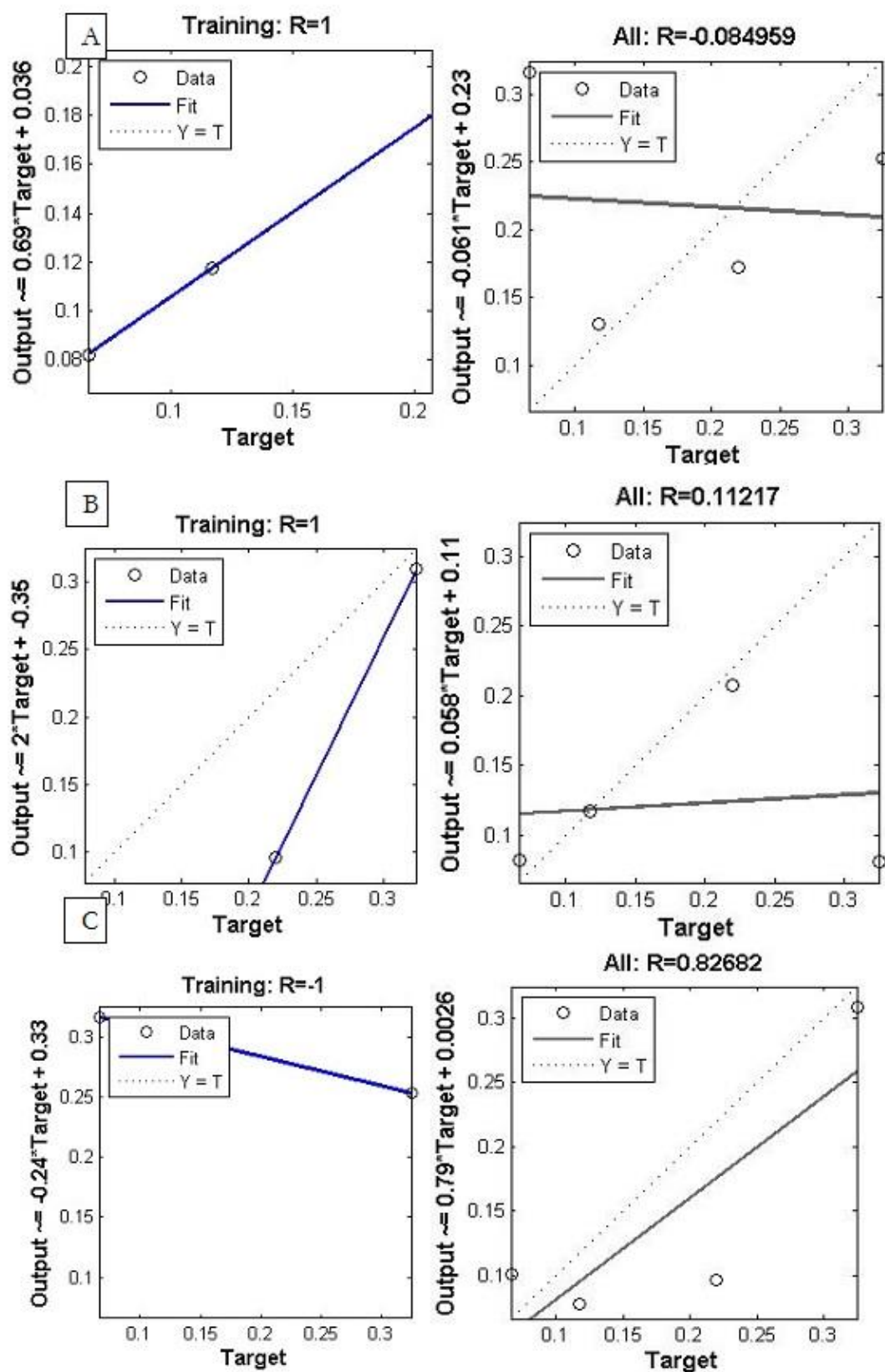


Figura 22 - Gráficos dos Coeficientes de Correlação A: Tangente Hiperbólica; B: Degrau C: Sigmoidal. Fonte: Autor (2015)

Posteriormente a aplicação dos testes com o auxílio das redes neurais artificiais, decidiu-se utilizar os dados obtidos com a função “Sigmoidal” para a elaboração da álgebra de mapas, pois como já comentado anteriormente foi o que atingiu o maior fator de correlação. Para esse processo os valores obtidos no treinamento da função foram submetidos ao Software de ambiente SIG para a elaboração da álgebra de mapas aplicada a equação 10.

$$\text{Mapa de Vulnerabilidade} = D * 0,087631 + U * 0,11421 + P * 0,26772 + Pr * 0,31017 \quad (10)$$

Onde:

D: Declividade

U: Uso do Solo

P: Pedologia

Pr: Precipitação

A inclusão desses valores no ambiente SIG com o auxílio também da ferramenta “*Raster Calculator*” resultou no mapa de vulnerabilidade apresentada na Figura 23 com o gráfico relacionando o percentual de áreas no mapa a seguir (Figura 24).

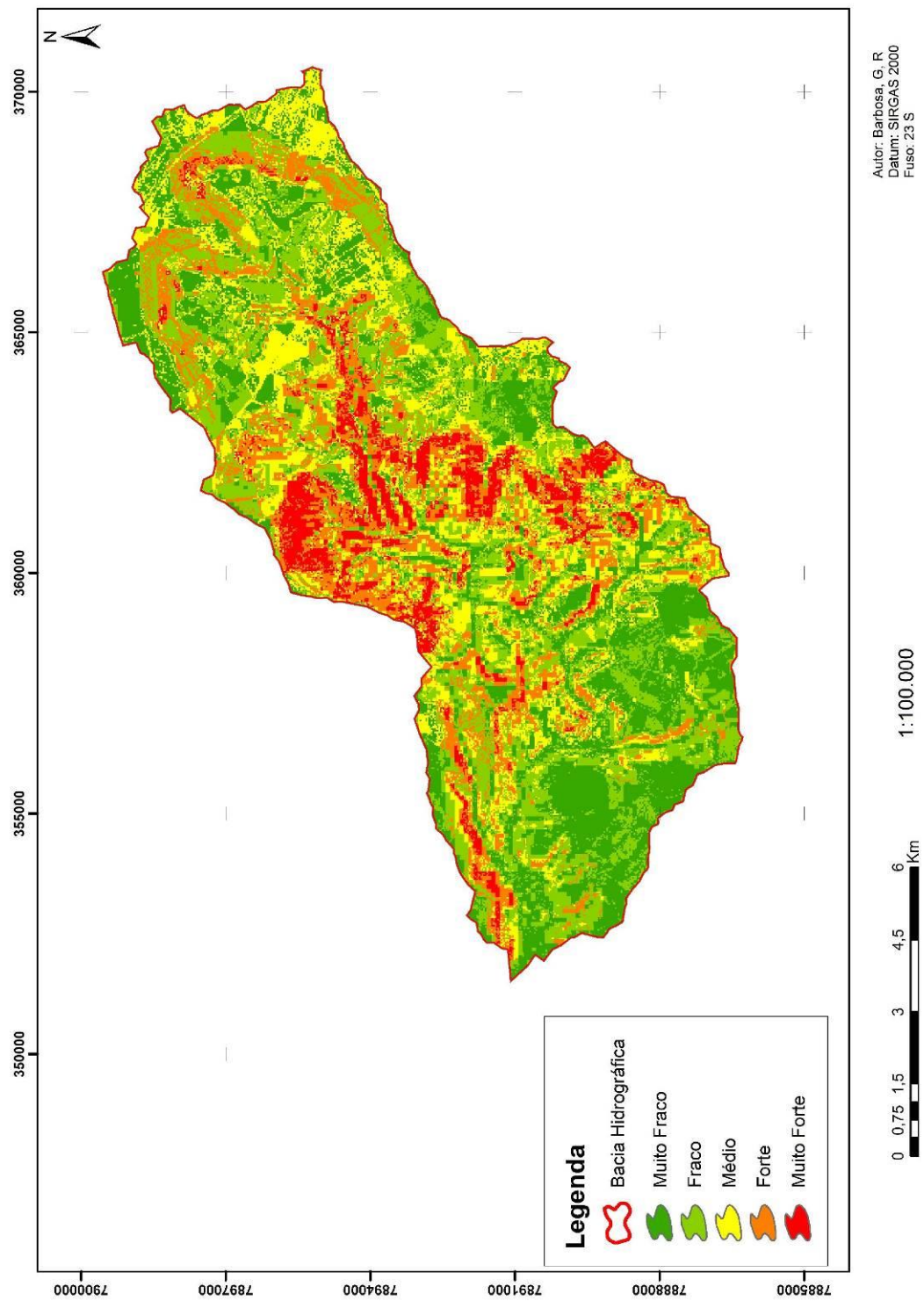


Figura 23 - Imagem do Mapa de vulnerabilidade considerando as ponderações da RNA (Caso 2)

Ao observar a Figura 24, nota-se que a distribuição das áreas apresentou modificações em relação à técnica AHP e ao Caso 1. Nesse cenário 53% da bacia estão classificados como “Muito Fraco” e “Fraco”, apesar de observar redução nos dados essas classes apresentaram uma distribuição mais homogênea. Também é observado que as classificações “Forte” e “Muito e Forte” representa área 25% da área da bacia, situando-se principalmente na porção central na área de estudo, mas neste cenário as a classificação de “Forte” e “Muito e Forte” apresentou distribuição em áreas da bacia com utilização agrícola.

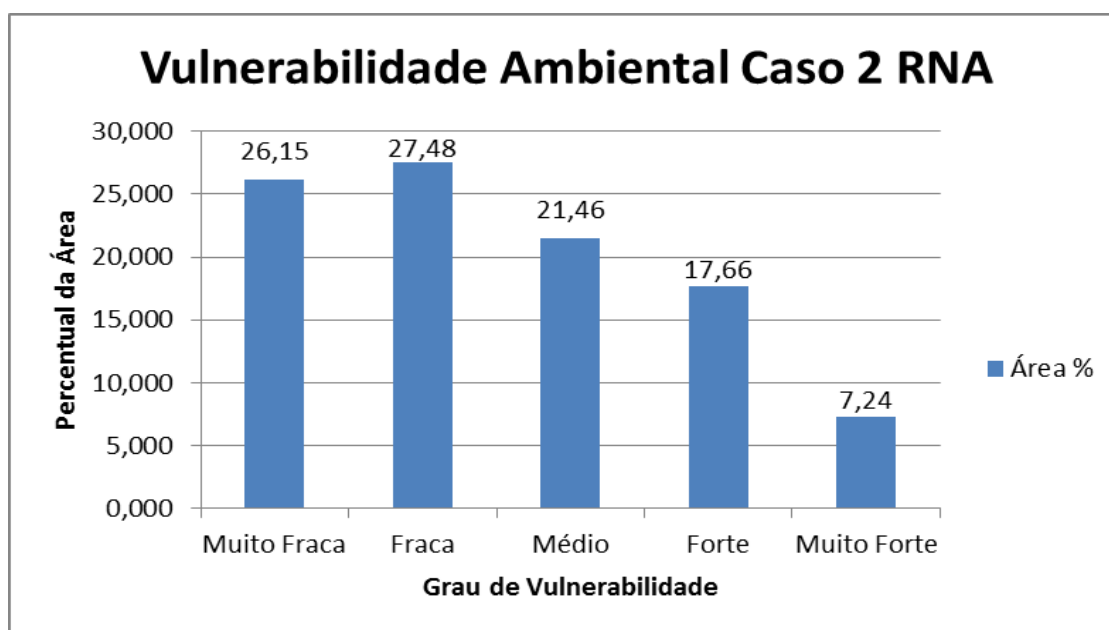


Figura 24 Gráfico de Percentual de Áreas (Caso 2)
Fonte: Autor (2015)

Finalizando as análises dos cenários propostos, foi possível identificar que a diferença existente entre os mapas pode ser explicada pelos ruídos existentes entre a técnica AHP (método Ross), e a utilização das redes neurais artificiais juntamente com o refinamento do segundo caso, possibilitou certa redução da subjetividade provocada pelos ruídos encontrados nos dados utilizados como base. Ainda vale ressaltar que houve uma redução, mas não a eliminação da subjetividade.

4.2.3- Análise comparativa dos cenários

Ao analisar os resultados obtidos nos cenários propostos, notar-se uma diferença entre as classes de vulnerabilidade ambiental. Analisando especificamente a classe “Muito Fraca” presente no entre o caso 1 e o AHP (Tabela 26) observa-se que na área em questão houve uma redução de 8 km² ou 6,75%

Tabela 26 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1

Classificação	AHP (%)		Caso 1	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Muito Fraco	28,000	25,000	20,440	18,250

Fonte: Autor (2015)

Somando a análise anterior, observa-se que houve um acréscimo em áreas próximas a mananciais hídricos, (localizadas na Figura 25 como áreas A e B), ou seja, próximo a áreas de preservação permanente (APP), onde possui uma quantidade de vegetação significativa, consequentemente reduzindo o potencial de vulnerabilidade.

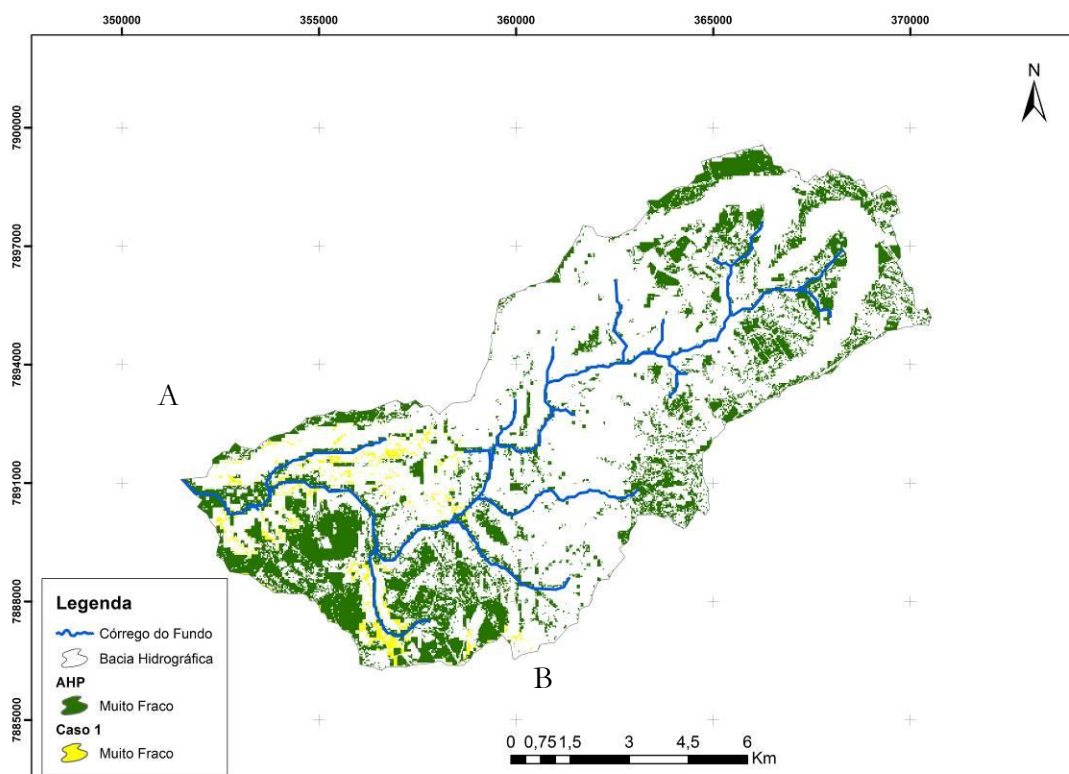


Figura 25 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Muito Fraco”.
Fonte: Autor (2015)

Ao analisar o conjunto de dados do Caso 2 demonstrado na Tabela 27, diferentemente do primeiro cenário, distingue-se um acréscimo na área da classificação de “Muito Fraco” de 1,29 km², representado por 1,152%.

Tabela 27 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2

Classificação	AHP (%)		Caso 2	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Muito Fraco	28,000	25,000	29,290	26,152

Fonte: Autor (2015)

A Figura 26 apresentou que o acréscimo ocorreu em áreas aleatórias, não apresentando o mesmo exemplo encontrando no cenário anterior.

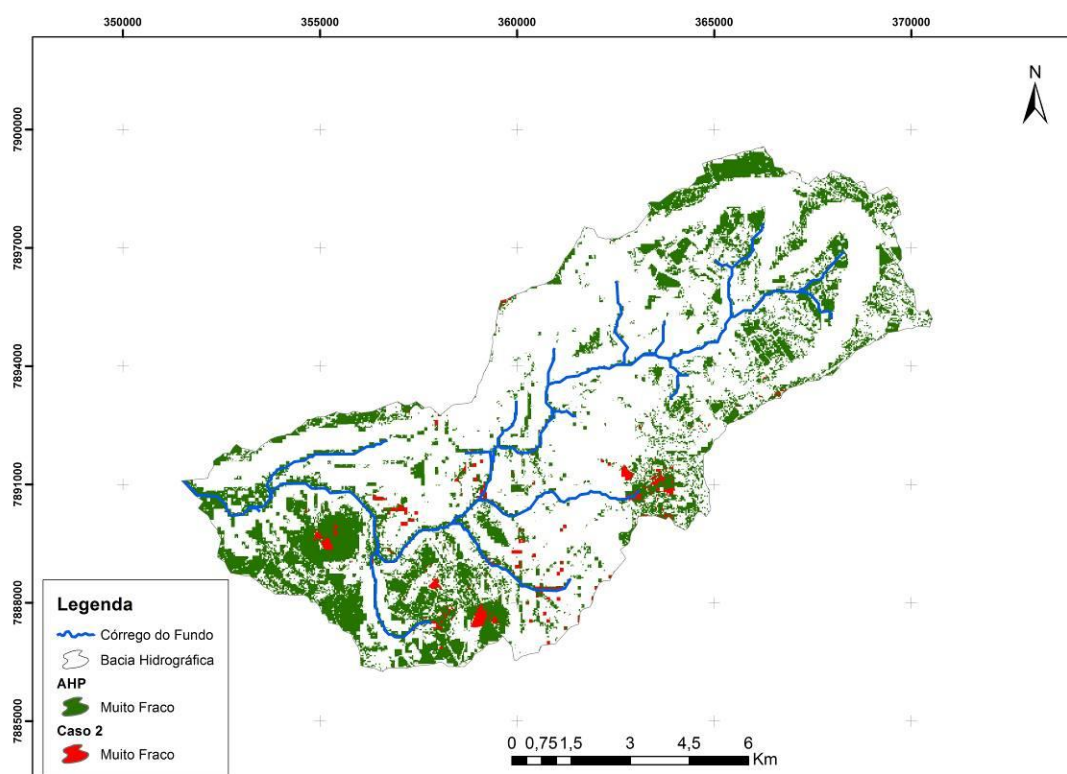


Figura 26 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Muito Fraco”.

Fonte: Autor (2015)

Analisando a classe de vulnerabilidade ambiental “Fraco”, observa-se que houve uma redução na área, passando de 45km² para 39,190 km² (Tabela 28), demonstrando uma variação de 6% em relação a técnica AHP.

Tabela 28 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1

Classificação	AHP (%)		Caso 1	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Fraco	45,000	40,179	39,190	34,991

Fonte: Autor (2015)

Nota-se na Figura 27, que o aumento significativo aconteceu na área demonstrada abaixo. Essa área, tomando como referência o mapa de uso do solo (Figura 13), verifica-se que possuem uma cobertura vegetal consistente (Classificada como área de Lavoura), sendo assim, possuindo característica menos propício a vulnerabilidade ambiental.

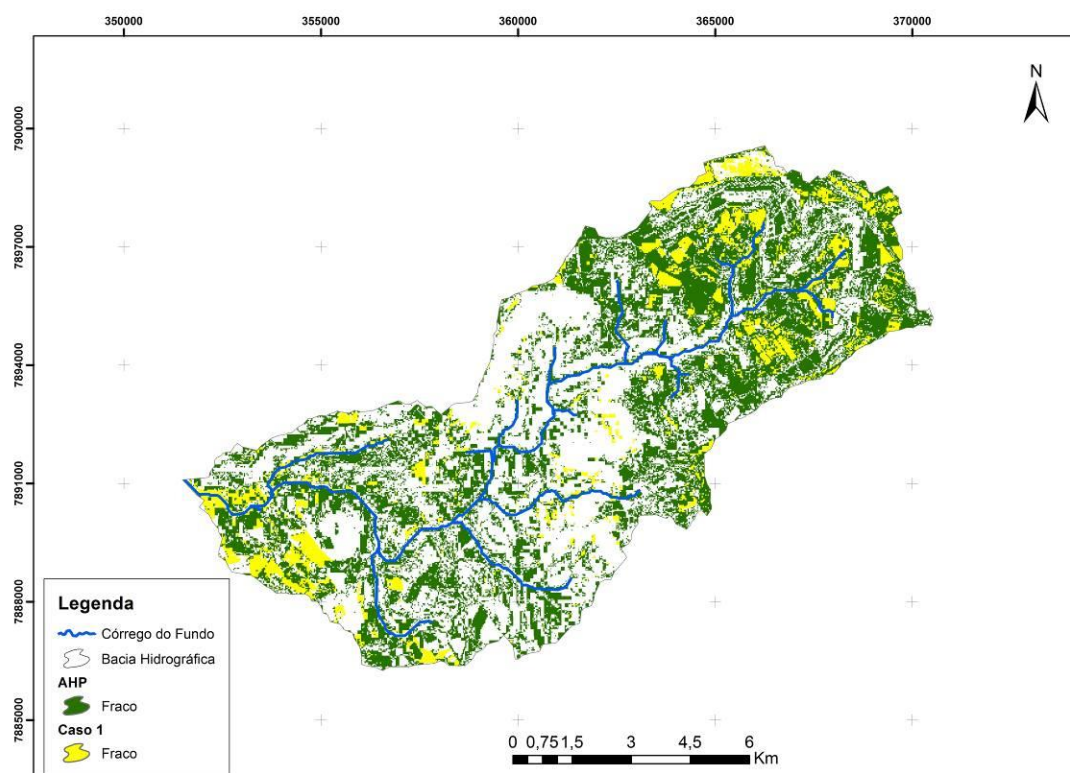


Figura 27 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Fraco”.

Fonte: Autor (2015)

Considerando a classe “Fraco”, no “Caso 2”, observa-se uma redução da área (Tabela 29), indicado um decréscimo de 14,22 km², representando uma perda de 12,69%.

Tabela 29 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2

Classificação	AHP (%)		Caso 2	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Fraco	45,000	40,179	30,780	27,482

Fonte: Autor (2015)

Analisando mais especificamente a Figura 28, observou-se que a redução realmente aconteceu, mas as áreas anteriormente alocadas na porção sul da bacia passaram para áreas adjacentes (como indica figura abaixo). Associando essa informação com as características físicas da bacia, nota-se que essa área possui um percentual também elevando, sendo assim, propício para a classe de “Fraco” de vulnerabilidade ambiental.

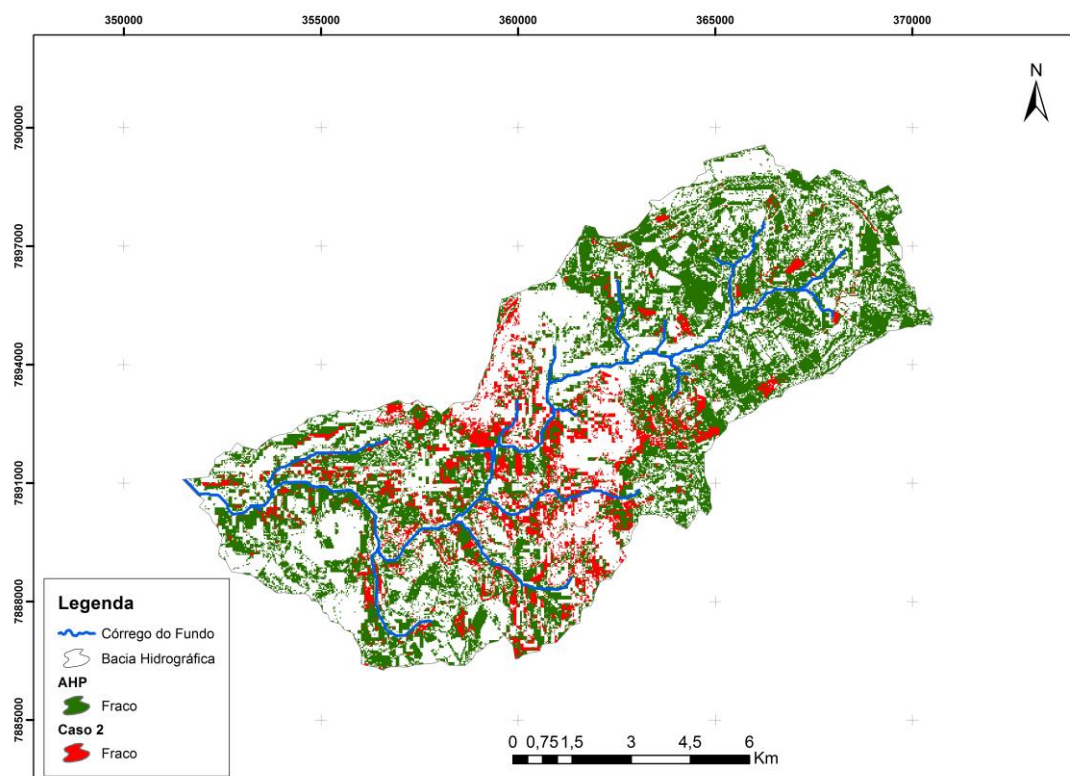


Figura 28 - Imagem do Mapa de Áreas Técnicas AHP e o Caso 2 Classe “Fraco”.

Fonte: Autor (2015)

Analisando a classe de vulnerabilidade ambiental “Média”, observa-se como resultado os dados abaixo:

Tabela 30 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1

Classificação	AHP (%)		Caso 1	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Médio	24,000	21,429	28,000	25,000

Fonte: Autor (2015)

Observa-se um aumento entorno de 4% da área observada na Figura 29 e Tabela 30. Ao analisar o mapa de uso do solo (Figura 13), conclui-se que esta classe está alocada em áreas que possuem cobertura vegetal classificadas com pastagens e lavouras, sendo assim, mais propícia a vulnerabilidade ambiental. Outra observação pertinente a localização das áreas, é que grande parte das áreas classificadas como Muito Fraco e Fraco o grau de vulnerabilidade se encontra nessa classe após a aplicação da RNA.

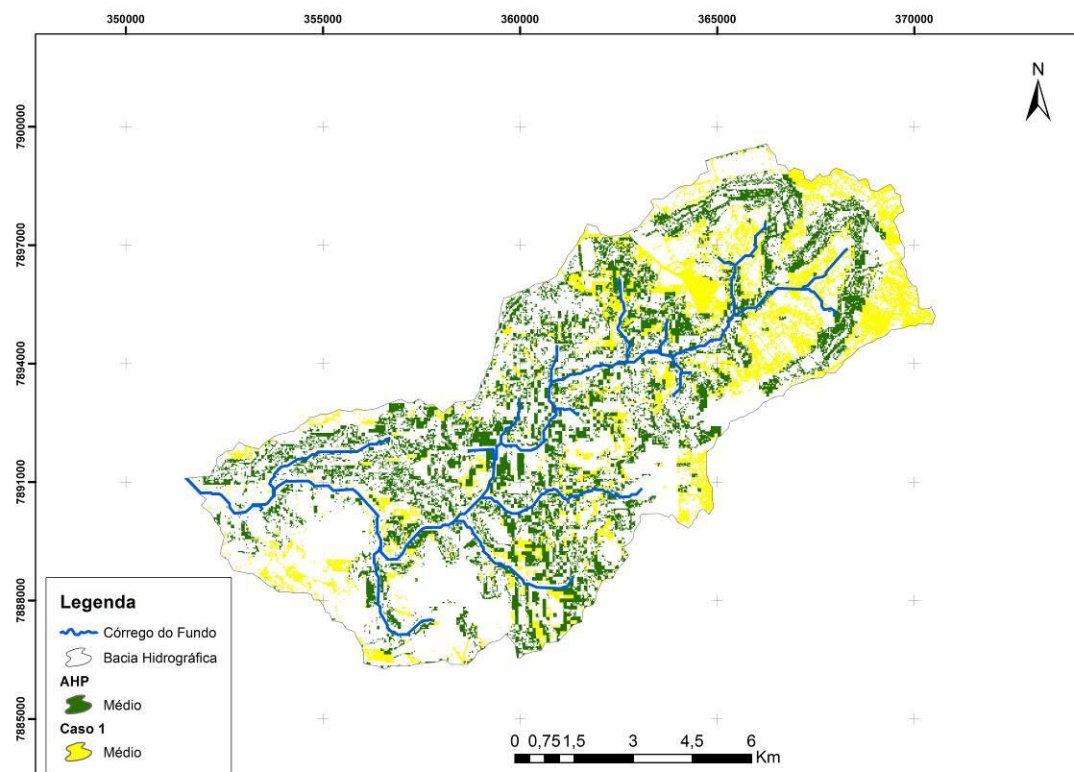


Figura 29 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe "Médio".

Fonte: Autor (2015)

Para o segundo caso, analisando a classe de vulnerabilidade ambiental "Média", nota-se como resultado obtido no "Caso 2" os dados abaixo:

Tabela 31 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2

Classificação	AHP (%)		Caso 2	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Médio	24,000	21,429	24,040	21,464

Fonte: Autor (2015)

A Tabela 31, juntamente com a Figura 30, demonstra resultados próximos em relação às áreas. A diferenciação observada está colocada em áreas que possuem uma cobertura vegetal classificada como pastagem e lavoura, classificação que possuem características propício a vulnerabilidade ambiental.

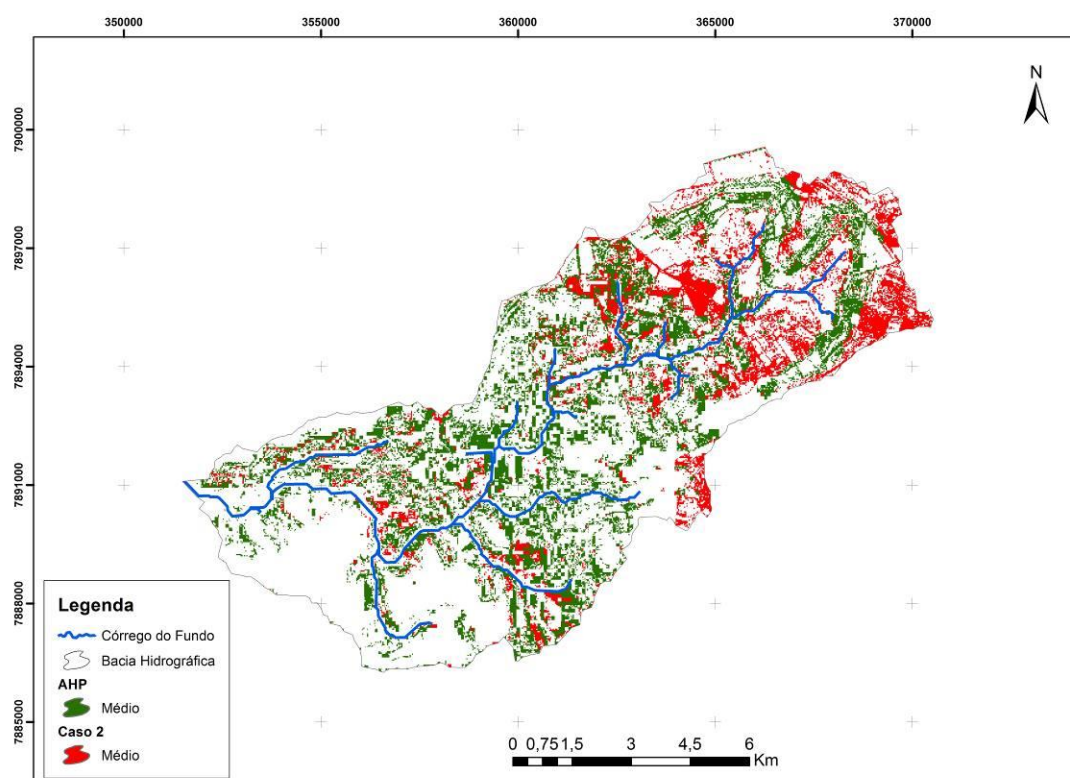


Figura 30 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Médio”.

Fonte: Autor (2015)

Analisando a classe de vulnerabilidade ambiental “Forte”, tem-se como resultado os dados abaixo:

Tabela 32 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1

Classificação	AHP (%)		Caso 1	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Forte	11,000	9,821	18,660	16,661

Fonte: Autor (2015)

Observa-se um aumento entorno de 8% (Tabela 32), para a classe “Forte”, apresentando um incremento significativa de área na porção norte da bacia, também demonstrada na Figura 31.

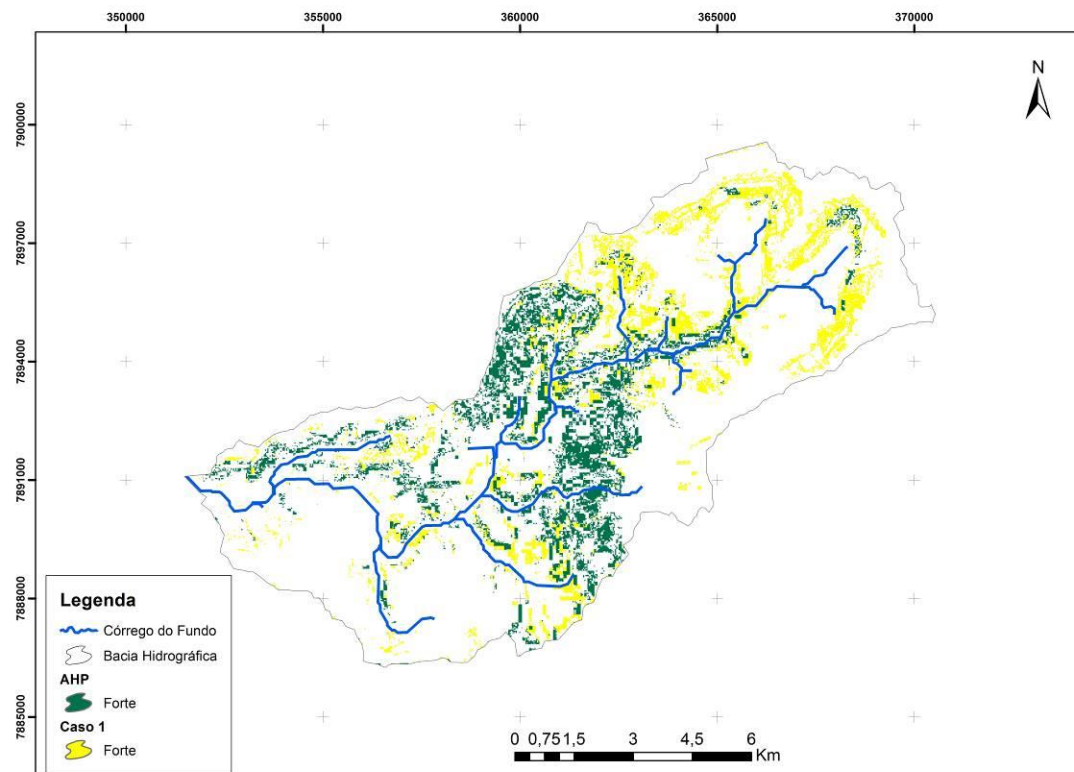


Figura 31 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Forte”.
Fonte: Autor (2015)

Avaliando a classe de vulnerabilidade ambiental “Forte”, observam-se como resultado obtido no “Caso 2” os dados abaixo:

Tabela 33 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2

Classificação	AHP Ross (%)		Caso 2	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Forte	11,000	9,821	19,780	17,661

Fonte: Autor (2015)

Ao analisar os resultados apresentado, observa-se o aumento de cerca de 7% (Figura 32 e Tabela 33). Esse aumento, ao analisar o mapa de uso do solo (Figura 13), está alocado em

áreas que possuem uma cobertura vegetal classificada como pastagem, lavoura e solo exposto, sendo assim, mais propícia a vulnerabilidade ambiental.

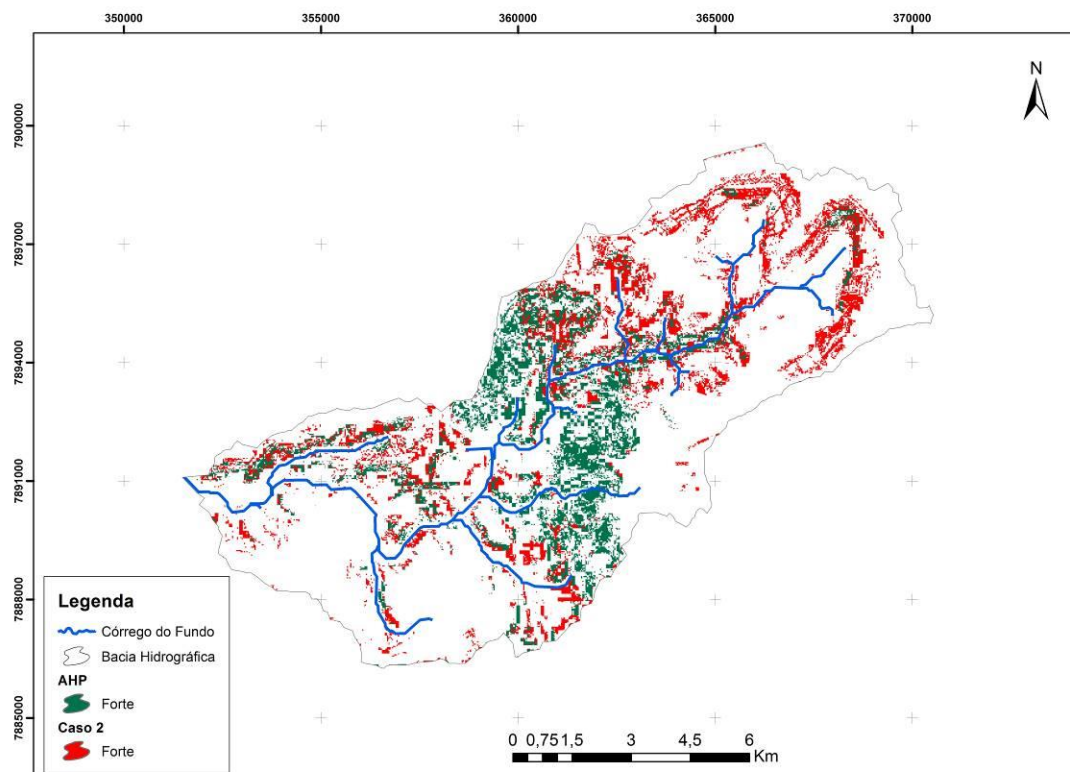


Figura 32 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Forte”.
Fonte: Autor (2015)

Considerando a classe de vulnerabilidade ambiental “Muito Forte”, observam-se como resultado os dados abaixo:

Tabela 34 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 1

Classificação	AHP Ross (%)		Caso 1	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Muito Forte	4,000	3,571	5,710	5,098

Fonte: Autor (2015)

Ao ponderar os resultados, observa-se um aumento de cerca de 2% da área (Figura 33 e Tabela 34), demonstrando proximidade com o método proposto por Ross (1994). Conclui-se que está alocada em áreas que possuem uma cobertura vegetal menos consistente e também apresenta uma declividade acentuada, sendo assim (Pastagem, Lavoura e Área de APP), mais propícia a vulnerabilidade ambiental.

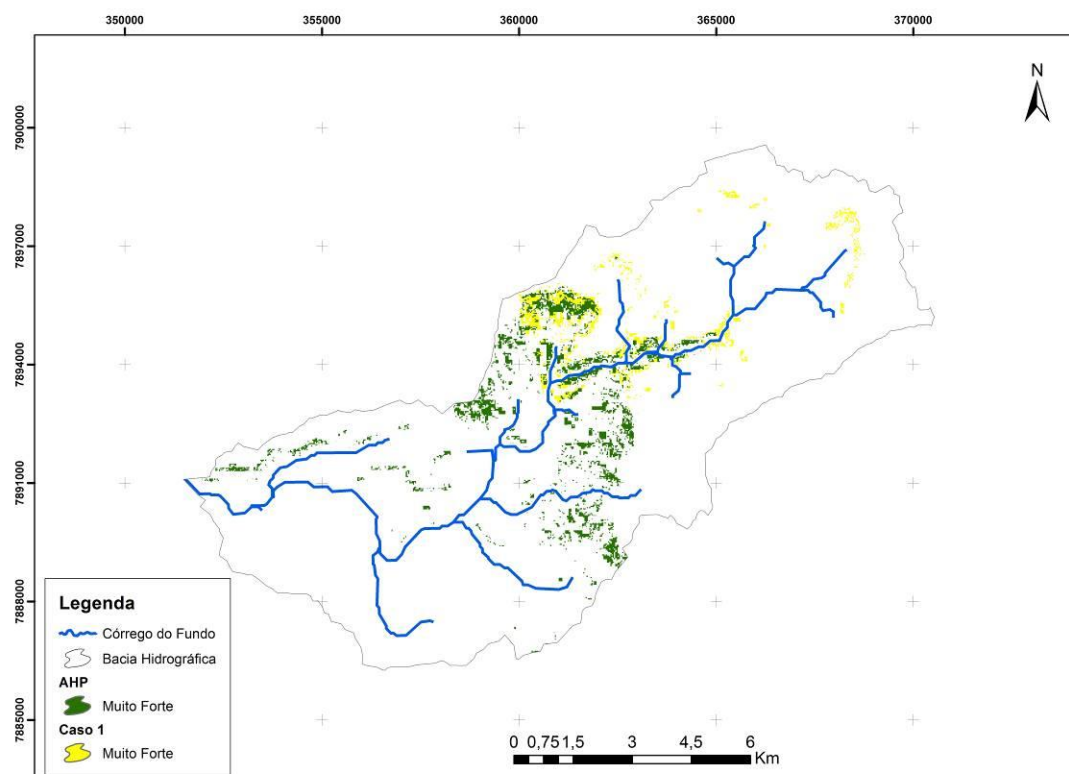


Figura 33 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 1 Classe “Muito Forte”.
Fonte: Autor (2015)

Avaliando a classe de vulnerabilidade ambiental “Muito Forte”, nota-se como resultado obtido no “Caso 2” os dados abaixo:

Tabela 35 - Área e Percentual Variação AHP e Caso 2

Classificação	AHP Ross (%)		Caso 2	
	Área km ²	%	Área km ²	%
Muito Forte	4,000	3,571	8,110	7,241

Fonte: Autor (2015)

Ao analisar os dados obtidos, observa-se que a área dobrou passando a 7,24% (Figura 34 e Tabela 35), demonstrando uma pequena discrepância com o método proposto por Ross (1994). Concluindo que está área alocada em espaços que possuem uma cobertura vegetal menos consistente ou inexistente. Nota-se que a Figura 34 apresenta suas áreas localizadas na porção central da bacia, mas um fator que tem que ser notado é que foram identificadas

áreas de vulnerabilidade “Muito Forte” na porção sul e norte, demonstrando diferença entre o modelo proposto por Ross (1994) e os resultados obtidos com o auxílio das RNA.

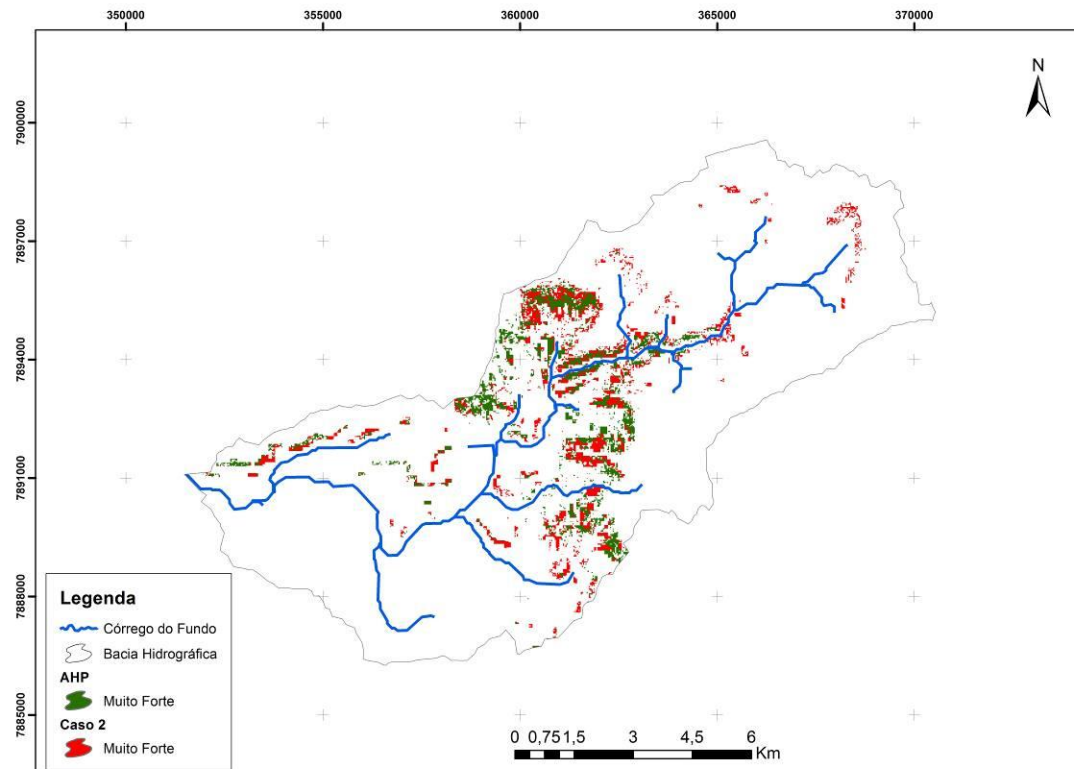
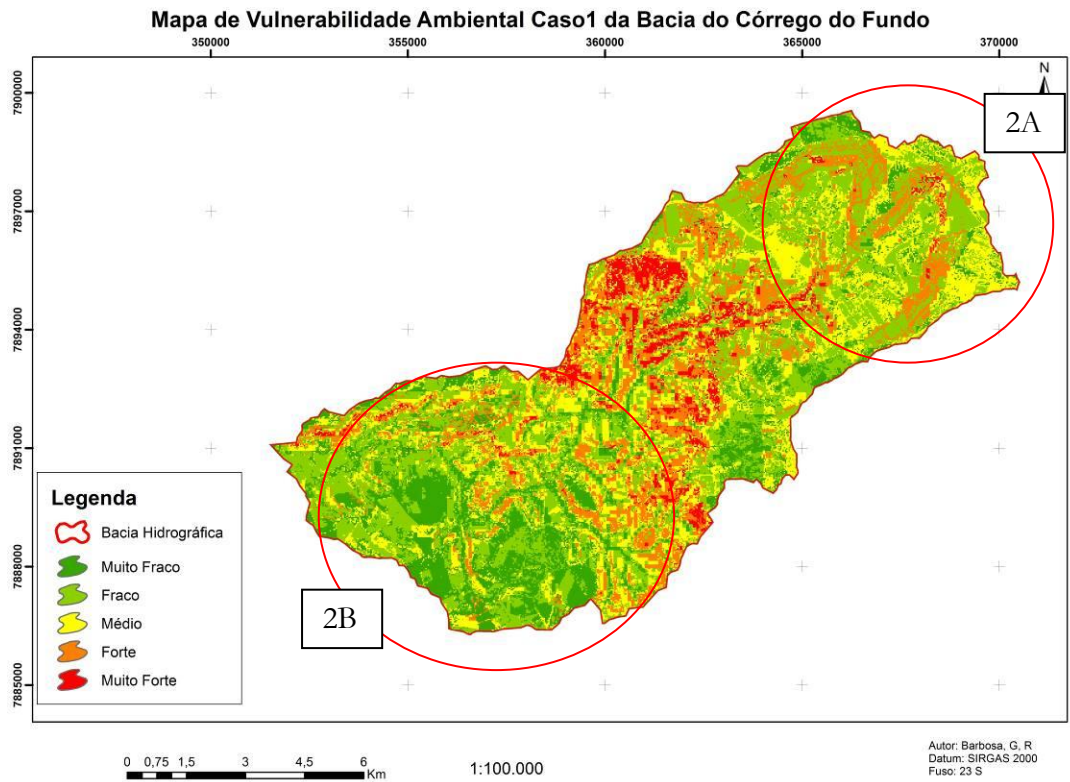
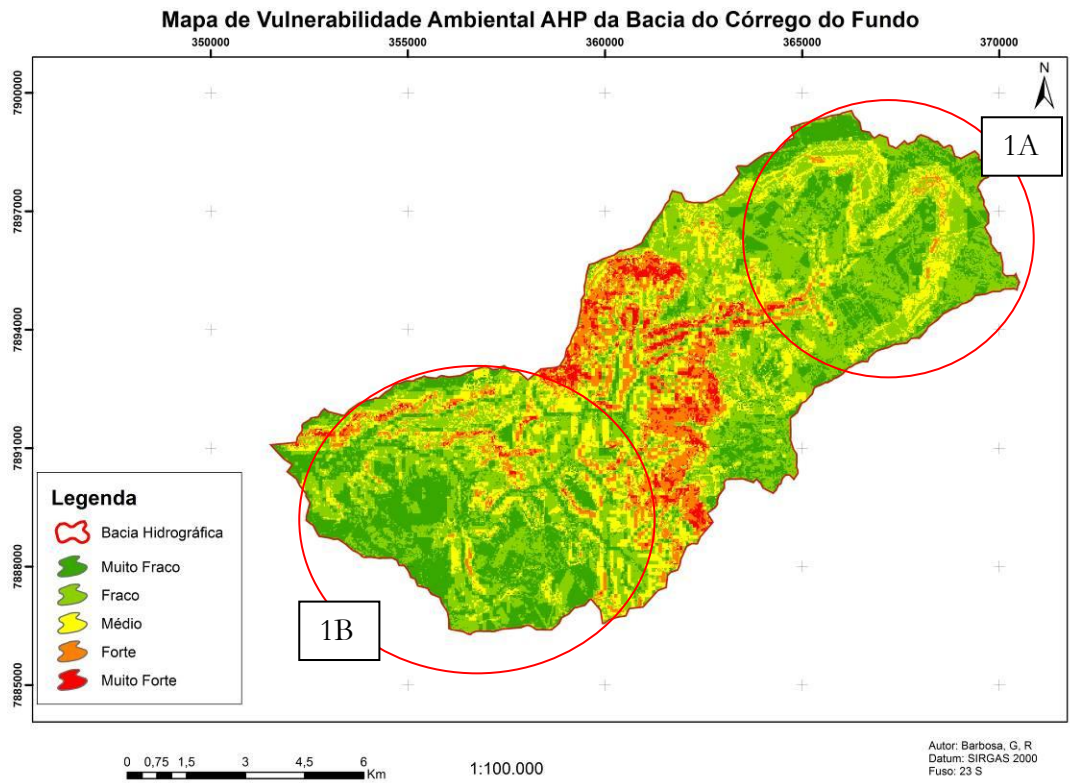


Figura 34 - Imagem do Mapa de Áreas Técnica AHP e o Caso 2 Classe “Muito Forte”.
Fonte: Autor (2015)

4.3- Comparativos entre resultados

A comparação das variações dos mapas de vulnerabilidade para cada caso estão apresentadas na Figura 35. Nesta figura, as diferenças estão indicadas pelos números 1, 2 e 3, divididas em duas áreas A e B. As áreas 1A e 1B são resultados da aplicação da AHP, as áreas 2A e 2B são os resultados do Caso 1, ou seja, empregando as informações dos especialistas, e as áreas 3ª e 3B são os resultados do Caso 2, que foi a técnica de refinamento proposta no estudo.



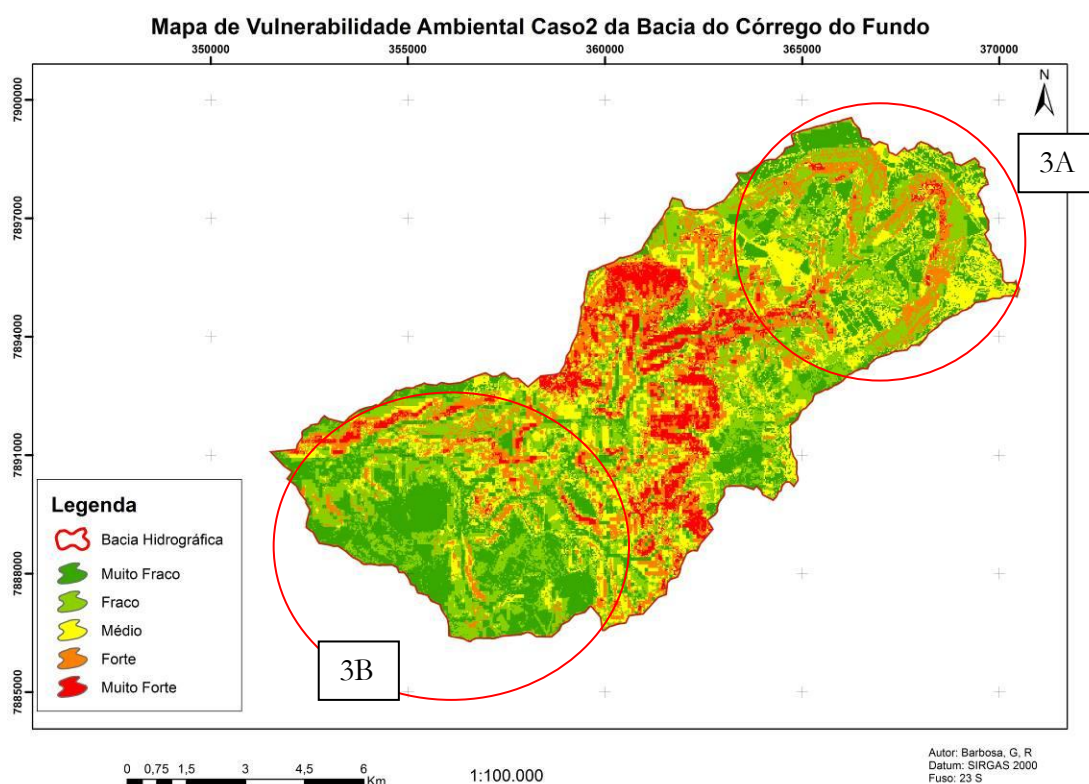


Figura 35 - Imagem do Mapa da Diferença de Áreas entre 1 = AHP, 2 = Caso 1 e 3 = Caso 2
Fonte: Autor (2015)

Concluindo as considerações dos cenários indicados, foi possível identificar que a diferença existente entre os mapas pode ser esclarecida pelos ruídos existentes na técnica AHP (método Ross), e a utilização das redes neurais artificiais juntamente com o refinamento do segundo caso, possibilitou certa redução da subjetividade provocada pelos ruídos encontrados nos dados utilizados como base. Ainda vale ressaltar que houve uma redução, mas não a eliminação da subjetividade.

Tabela 36 – Comparação de Áreas Obtidas nas Comparações

Classificação	AHP (%)		Caso 1 (Rede 1)		Caso 2 (Rede 2)	
	Área km ²	%	Área km ²	%	Área km ²	%
Muito Fraco	28,12	24,87	20,44	18,25	29,29	26,152
Fraco	45,59	40,33	39,19	34,991	30,78	27,482
Médio	24,30	21,49	28,00	25	24,04	21,464
Forte	11,04	9,77	18,66	16,661	19,78	17,661
Muito Forte	4,00	3,54	5,71	5,098	8,11	7,241
Total	113,05	100	113,05	100	113,05	100

Fonte: Autor (2015)

Analisando-se a Tabela 36 com a Figura 36, observa-se que a classe “Muito Fraca” apresentou um comportamento no entre o cenário do AHP e o Caso 1 de redução da área, passando de 24,87% para 18,25% e ao comparar com o Caso 2, nota-se um pequeno acréscimo de área, passando para 26,15%. Ao analisar a classe “Fraca”, observa-se que houve um comportamento constante de redução de área entre os cenários, saindo de 40,33% no cenário do AHP para 34,99% no segundo cenário e para o terceiro cenário 27,48%, demonstrando um decréscimo total de 12,69%. Agora para a classe “Média” nota-se que o comportamento dos dados apresentou primeiramente um acréscimo de área, saindo de 21,49% no cenário AHP para 25% no cenário Caso 1 e posteriormente estabilizou com uma área de 21,46% no cenário do Caso 2. A classe “Forte” apresentou o mesmo comportamento da classe “Muito Forte”, na qual as duas apresentaram um acréscimo constante. Na classe “Forte”, iniciou no cenário AHP com 9,77% passando para 16,661% no cenário do Caso 1 e 17,66% no cenário do Caso 2 e na classe “Muito Forte” iniciou no cenário AHP com 3,54% passando para 5,09% no cenário do Caso 1 e 7,24% no cenário do Caso 2.

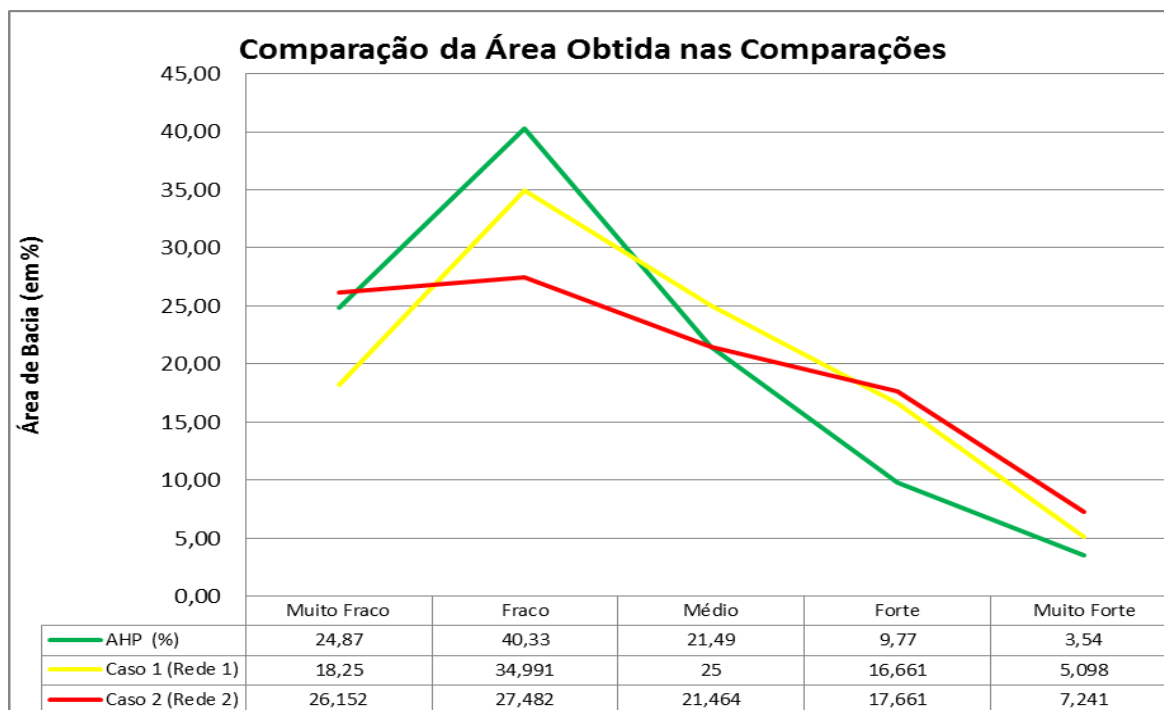


Figura 36 – Gráfico da Comparação de Áreas Obtidas nas Comparações
Fonte: Autor (2015)

Com o intuito de avaliar melhor os resultados, os dados obtidos com a utilização das RNA's foram submetidos ao método estatístico Kruskal-Wallis. A Tabela 37 apresenta as configurações aplicadas para a calibração de entradas dos dados, na qual, foram utilizados os resultados do método AHP, tomado como padrão de comparação, e os dados obtidos nas redes dos Casos 1 e 2. O Teste de Kruskal-Wallis é utilizado quando se deseja testar a hipótese de que várias amostras têm a mesma distribuição.

Tabela 37 - Informações Kruskal-Wallis rank sum test

<i>Informação</i>	<i>Valor</i>
Kruskal-Wallis qui-quadrado	3
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,391625176

Fonte: Autor (2015)

Ao analisar a Tabela 38 a comparação de multicamadas entre a base do AHP e o Caso 1, observou-se a interação entre 3 grupos de dados, e as outra interação não apontaram diferenças significativas, demonstrando que existe correlação entre os dados de entrada e saída das redes elaboradas.

Tabela 38 - Comparações Múltiplas Caso 1

<i>Fatores Comparados</i>	<i>Diferença Observada</i>	<i>Diferença Crítica</i>	<i>Diferença</i>
0.26335 - 0.49353	0,02236	4,816777	Não
0.26335 - 0.5488	0,01124	4,816777	Não
0.26335 - 0.55788	0,01144	4,816777	Sim
0.49353 - 0.5488	0,01178	4,816777	Sim
0.49353 - 0.55788	0,03247	4,816777	Não
0.5488 - 0.55788	0,02368	4,816777	Sim

Fonte: Autor (2015)

O teste foi repetido com os resultados do caso 2 e o padrão de comparação. A Tabela 39 apresenta os resultados. Nesse cenário observasse que a interação sofreu modificações, passando a possuir quatro grupos de dados a possuir interação, demonstrando que o refinamento aumentou a confiabilidades dos dados.

Tabela 39 - Comparações Múltiplas Caso 2

<i>Fatores Comparados</i>	<i>Diferença Observada</i>	<i>Diferença Crítica</i>	<i>Diferença</i>
0.070181 - 0.072063	0,01326	4,816777	Sim
0.070181 - 0.1356	0,01214	4,816777	Sim
0.070181 - 0.16655	0,02658	4,816777	Sim
0.072063 - 0.1356	0,02247	4,816777	Não
0.072063 - 0.16655	0,01365	4,816777	Sim
0.1356 - 0.16655	0,03365	4,816777	Não

Fonte: Autor (2015)

Finalizando as comparações entre as análises estatísticas observou-se que as significâncias entre os casos estão alocadas nas classes “Forte” e “Muito Forte”, justamente as classes que possuíram maior modificação com a implementação das Redes Neurais.

Tabela 40 - Correlação Qui-Quadrado de Homogeneidade dos Especialistas

<i>Qui-Quadrado</i>	<i>3,989726645</i>
GL	12
Erro	0,01
Q-Critico	18,549
Q-Mínimo	3,57

Fonte: Autor (2015)

Completando o comparativo entre os resultados, a correlação Qui-Quadrado (Tabela 40) foi aplicada como teste de homogeneidade para os dados dos especialistas. Observa-se que o valor crítico da homogeneidade a 90% é 18,549 e o valor mínimo a 10 % é 3,57 e o valor Qui-Quadrado alcançado foi de 3,989726645, indicando que 90% dos dados apresentam estão dentro de parâmetros aceitáveis. Vale ressaltar que ao utilizar 95% como parâmetro os dados não serão atestados com válidos. Entretanto, esta qualificação de 90% foi tida como aceitável frente ao pequeno grupo de especialistas avaliado.

CAPÍTULO 5

Conclusões

Os resultados trabalhados nessa dissertação servem para mostrar o quanto é complexo a modelagem de sistemas ambientais. A modelagem da vulnerabilidade ambiental é um grande desafio, pois implica em entender de forma qualitativa e quantitativa a relação entre diversas variáveis ambientais e a dinâmica natural das mesmas, que é extremamente complexa. A problemática da modelagem ambiental, mesmo quando há o conhecimento qualitativo e quantitativo da dinâmica sistêmica, não é facilmente reproduzido para um modelo matemático.

Apesar da dificuldade em expressar a dinâmica natural em modelos matemáticos, o método AHP apresenta certo grau de acerto, mas a técnica é limitada pela avaliação da qualidade da ponderação em si mesma. Uma dessas limitações é pautada na subjetividade que os dados de entrada podem apresentar, pois índice de consistência (IC) expressa um fator de coesão da matriz pareada.

Nesse contexto de incertezas, esse estudo aplicou uma ferramenta para elaboração do modelo de vulnerabilidade ambiental, as redes neurais (RNA), empregando os conhecimentos de experiências de especialistas na área da bacia estudada, de forma a reduzir a arbitrariedade e a subjetividade do processo para elaboração do modelo, apesar da redução das subjetividades observou-se que as mesmas não foram totalmente extintas, abrindo caminhos para novos estudos.

A capacidade da RNA em lidar com um grande número de dados deixa condições vantajosas em relação aos modelos comumente utilizados para trabalhar dados ambientais (modelos lineares), pois existe a possibilidade de envolver um gama enorme de fatores a serem considerados. As RNAs também possuem a capacidade de trabalhar com dados que possuem alto grau de ruídos, assim possibilitando melhores análises ambientais naturais.

Ao observar os dados obtidos nesse trabalho, é possível concluir que a associação proposta obteve resultados satisfatórios ao considerar não apenas um fator isolado como Ross apresenta em seu modelo (Declividade), mas trabalhar um conjunto de variáveis. Através do treinamento e da aprendizagem da rede, foi possível variar a relevância entre as variáveis considerando as análises de vulnerabilidade ambiental e propondo a variável de uso do solo como uma variável que apresenta um certo grau de importância maior com relação ao proposto no modelo de Ross.

O resultado da aplicação da RNA (Caso 1) foi influenciado pelos especialistas em face de diversidade das informações, e observa-se que o valor crítico da homogeneidade está entre os valores limítrofes da distribuição para o número de graus de liberdade, sendo aceito para 90% da validação. Esse valor indica que mesmo ao se tratar de um grupo de especialistas pequeno frente ao grau de especialização do mesmo, foi possível chegar a resultados aceitáveis.

Os resultados da aplicação do Caso 2 com a utilização do refinamento, obteve-se um resultado satisfatório, sendo possível a distinção das classes com maior assertividade. Também foi observado que houve uma interação maior com os resultados do teste de Kruskal-Wallis, assim apresentando significância para apenas algumas classes, justamente aquelas obtiveram maiores variações em áreas, ainda que a correlação não seja linear neste caso.

Concluindo essa pesquisa um importante ponto para a sua continuação é desassociar as ponderações iniciais do paradigma da declividade como elemento principal, assim vinculando ao método novas ponderações para possuir dados mais assertivos para as análises ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D.M. (2007). **Quantificação da glicemia através de análises de imagens da íris humana utilizando redes neurais**. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BANA E COSTA CA & VANSNICK JC. 2001. **Une crítica de base de de l'approche de Saaty: mise en question de la methode de la valeur propre maximale**. Cahier du LAMSADE, Université Paris Dauphine, Paris-.

BARRELLA, W. et al. **As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes**. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BOTELHO, R.G.M. **Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica**. In: **Erosão e Conservação dos Solos** – conceitos, temas e aplicações. A.J.T. GUERRA, A.S. SILVA & R.G.M. BOTELHO (org.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

BRANS, J. P., "L'ingenierie de la decision: 1'elaboration d'instruments d'aide a la decision," *Colloq. d'aide a la decision*, Université Laval, Quebec, Canada, Aout 1982.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information systems for land resouces assessment**. Oxford, Clarendon Press, 1986. 193 p.

CÂMARA, G. & MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C. & MONTEIRO, M.V.M. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE. 2001. p. 289-320.

CARVALHO, W. A. C. **Variações da composição e estrutura do compartimento arbóreo da vegetação de oito fragmentos de floresta semidecídua do vale do Alto Rio Grande, MG**. 2002. 192 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CASTRO, Emiliano Gonçalves de. (1998) **”Reconhecimento de padrões em tomada de decisão utilizando redes neurais”**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, USP, São Paulo.

CECÍLIO, R.A.; REIS, E.F. **Apostila didática: manejo de bacias hidrográficas**. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Rural, 2006. 10p.

CIFUENTES-Rojas C, Kannan K, Tseng L, Shippen DE. 2011. **Two RNA subunits and POT1a are components of Arabidopsis telomerase**. *Proc Natl Acad Sci* 108: 73–78.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P. & FLORENZANO, T. **Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. São José dos Campos: INPE, 1996.

CUNHA, R.;C. **“Análise da influência das variáveis ambientais na determinação das vulnerabilidades da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão, São Carlos, SP”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia). Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.(2001)

CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. **A Questão Ambiental: Diferentes Abordagens**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2005. p. 248.

EMBRAPA. (1999). **“Sistema Brasileiro de Classificação de Solos”**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro.

FARIA, L.C., COSTA, J.G.C., RAVA, C.A., PELOSO, M.J.D., MELO, L.C., CARNEIRO, G.E.S., SOARES, D.M., DÍAZ, J.L. C., ABREU, A.F.B., FARIA, J.C., SARTORATO, A., SILVA, H.T., BASSINELLO, P.Z. & ZIMMERMANN, F.J.P. **BRS Requite: nova cultivar de feijoeiro comum de tipo de grão carioca com retardamento do escurecimento do grão**. 1.ed. Comunicado Técnico, 65. Santo Antônio de Goiás, GO. EMBRAPA Arroz e Feijão. 2003.

FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996. 90p.

FELFILI J.M., JUNIOR M.C.S., DIAS B.J., REZENDE A.V. **Estudo fenológico de *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville no cerrado sensu stricto da Fazenda Água Limpa no Distrito Federal, Brasil**. Rev. bras. Bot. vol.22 n.1 São Paulo Apr. 1999.

FIDALGO, E.C.C. **Critérios para a análise de métodos e indicadores ambientais usados na etapa de diagnóstico de diagnóstico ambiental de planejamentos ambientais**.- 2003. 276 p. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, 2003.

GEROMEL, L. H. **Aplicação de Sistemas Inteligentes em Projetos de Transformadores de Potência**. Tese de Doutorado, 2003, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, Campinas, 2003.

GIORDANO R, LIERSCH D (2011). **Participatory research for adaptive water management in a transition country – a case study from Uzbekistan**. Ecology and Society 15(3): 23. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss3/art23/>

GUERRA, A.T. **Dicionário geológico e geomorfológico**, Rio de Janeiro: IBGE, 1980. 446 p.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W. **Análise Multivariada de dados**. Porto Alegre. 5. ed. Rio Grande do Sul: Bookman, 2005. p.441-461.

IBGE - EMBRAPA - **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009 - Escala 1:5.000.000

KOMAC, M. 2005. **A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia**. *Geomorphology* 74 (2006) 17 – 28. doi:10.1016/j.geomorph.2005.07.005

KRUSKAL, W. H. e WALLIS, W.A. 1952. **Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis**. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 47, No. 260. (Dec., 1952), pp. 583-621. Disponível em: <http://links.jstor.org/sici?sici=0162-1459%28195212%2947%3A260%3C583%3AUORIOV%3E2.0.CO%3B2-A>. Acessado em: 08/01/2015

LAGO, W.J.S.; ARAÚJO, E.P.; TELES, M.G.L. **Vulnerabilidade natural à erosão na Região do Baixo Parnaíba-MA**. In: ANAIS DO XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009, p. 3975-3980.

MARTINS, F.B. et al. **Zoneamento Ambiental da sub – bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria (RS)**. Estudo de caso. *Cerne*, Lavras, v.11, n.3, p.315-322, jul./set. 2005.

MCCULLOCH, W., PITTS, W. 1943. **A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity**. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.

MEDEIROS, J.S.; CREPANI, E.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T. (1996) “**Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**”. INPE, São José dos Campos, São Paulo.

MIRANDA, J. I. (2010). **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informática Tecnológica, 2ª Ed., 425p.

NOBRE, M. N. **O Zoneamento Ecológico-Econômico como instrumento de planejamento e gestão ambiental: uma proposta para a bacia hidrográfica do rio Corumbataí (SP)**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. UNESP. Rio Claro - SP. 249 p. 2008.

PINESE JUNIOR, J. F. **Aplicação do método de análise hierárquica -AHP- para determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade, MG**. 2010. Monografia (Bacharel em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

PORTAL DOS COMITES DE BACIA DE MINAS GERAIS. Disponível em: <<http://comites.igam.mg.gov.br/>>. Acesso em 05/12/2014 às 12h30min.
Topodata Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em 05/12/2014

REBELO, F. **Riscos naturais e acção antrópica**. Coimbra: Imprensa da Universidade, 2003.

ROCHA, J.S.M. da; KURTS, S.M.J.M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. 4.ed. Santa Maria: UFSM/CCR, 2001. 120p.

ROSS, J.L.S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990. p. 85.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. **“Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados”**. In: Revista do Departamento de Geografia nº8, FFLCH-USP, São Paulo, 1994.

ROY, B. ELECTRE III: **Algorithme de classement basé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples**. Cahiers du CERO, v. 20, n. 1, p. 3-24, 1978.

RUHOFF, A. L.; PENNA E SOUZA, B. S.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R. S. **Lógica Fuzzy e zoneamento ambiental da Bacia do Arroio Grande**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2355-2362. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Available from: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.18.21.33>>. Access in: 2015, June 30.

SAATY, T. L. A. **Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures**: Journal of mathematical psychology. p. 234-281. 1977.

SABANÉS, L. **Manejo sócio-ambiental de recursos naturais e políticas públicas: um estudo comparativo dos projetos “Paraná Rural e Microbacias”**. 2002. Dissertação–Faculdade de Ciências Econômicas, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

SABBATINI, P., S.-K. Chiou, L. Rao, and E. White. 1995. **Modulation of p53-mediated transcriptional repression and apoptosis by the adenovirus E1B 19K protein**. Mol. Cell. Biol. 15: 1060-1070.

SABOYA, R. **Análises espaciais em planejamento urbano: novas tendências**. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 3, p. 61 -79, 2000.

SANTANA, D.P. **Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**, 2004. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).

SCHMIDT, M.A.R (2012). **USO DE MAPAS 3D PARA NAVEGAÇÃO VIRTUAL: UMA ABORDAGEM COGNITIVA**. Tese: Universidade Federal do Paraná, Programa de pós graduação em Ciências Geodésicas. 231pp.

SOUZA; P; H; T. **Rede Neural Artificiais para Monitoramento em Tempo Real de Potássio na Vinhaça in Natura**. Dissertação de Mestrado; UFCAR. São Carlos 2010.

SILVA, C. A.; NUNES, F. P. **Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE.** In: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, INPE, 2009. p. 5435-5442. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.19.56/doc/5435_5442.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2015.

SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: Conceitos e fundamentos.** Campinas: Editora da Unicamp, 1999.

SIMONOVIC, S. P. **Sustainable foodplain management participatory planning in the Red River Basin, Canada.** Workshop on Modelling and Control for Participatory Planning and Managing Water Systems. Venice. Disponível on-line em: <http://www.elet.polimi.it>. Acesso em: 03 de mar 2015. 2004.

SPÖRL, Christiane. **Análise da Fragilidade Ambiental Relevo-Solo com Aplicação de Três Modelos Alternativos nas Altas Bacias do Rio Jaguari-Mirim, Ribeirão do Quartel e Ribeirão da Prata.** Dissertação de Mestrado. São Paulo: FFLCH – USP, 2001.

SPÖRL, Christiane; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. **Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos.** Revista GeoUSP, São Paulo, n. 15, p. 39-49, 2004.

TRICART, J. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. p. 31.

TUCCI, C.E.M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1994. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4)

TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez.** RIMA, IIE, 2005.

APÊNDICE A

Formulário para Especialistas

Especialista: _____

Em um ambiente de bacia hidrográfica a vulnerabilidade ambiental é apontada como o termo de um meio passível a modificações significativas, causando o seu desequilíbrio sistêmico Rebelo (2003), onde os parâmetros de Geologia, Declividade, Precipitação e Uso e Ocupação do Solo são determinantes para a sua obtenção. Com relação a esses parâmetros responda as questões solicitadas de acordo com a tabela abaixo:

Valores	Importância Mútua
1	Extremamente menos importante que
2	Muito fortemente menos importante que
3	Fortemente menos importante que
4	Moderadamente menos importante que
5	Igualmente importante a
6	Moderadamente mais importante que
7	Fortemente mais importante que
8	Muito fortemente mais importante que
10	Extremamente mais importante que

Questionário:

Cenário 1: Com relação a Declividade qual dos parâmetros abaixo possui maior relevância?	Valores
1. Precipitação	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
2. Uso e Ocupação do Solo	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
3. Pedologia	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Cenário 2: Com relação a Pedologia qual dos parâmetros abaixo possui maior relevância?	Valores
1. Precipitação	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
2. Uso e Ocupação do Solo	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
3. Declividade	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Cenário 3: Com relação ao Uso e Ocupação do Solo qual dos parâmetros abaixo possui maior relevância?	Valores										
1. Precipitação	<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
2. Declividade	<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
3. Pedologia	<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Cenário 4: Com relação a Precipitação qual dos parâmetros abaixo possui maior relevância?	Valores										
1. Declividade	<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
2. Uso e Ocupação do Solo	<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1. Pedologia	<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		