



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Tese de Doutorado

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA DETERMINAÇÃO DOS RISCOS
A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA
DO AÇUDE CACHOEIRA DOS ALVES. ITAPORANGA-PB**

CARLOS LAMARQUE GUIMARÃES

**Campina Grande
Paraíba**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



**ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA DETERMINAÇÃO DOS RISCOS À
DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE
CACHOEIRA DOS ALVES, ITAPORANGA-PB**

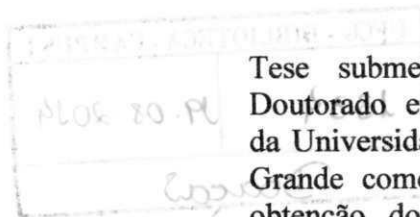
CARLOS LAMARQUE GUIMARÃES

CAMPINA GRANDE -PB

NOVEMBRO DE 2012

CARLOS LAMARQUE GUIMARÃES

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA DETERMINAÇÃO DOS RISCOS À
DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE
CACHOEIRA DOS ALVES, ITAPORANGA-PB**



Tese submetida ao Programa de Doutorado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Linha de pesquisa: Área de concentração em Irrigação e drenagem

Dr. JOÃO MIGUEL DE MORAES NETO

ORIENTADOR

Campina Grande

2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

- G963a Guimarães, Carlos Lamarque.
Análise multicritério na determinação dos riscos à degradação ambiental da Bacia Hidrográfica do Açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB / Carlos Lamarque Guimarães. – Campina Grande, 2012.
110f.
- Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientador: Prof. Dr. João Miguel de Moraes Neto.
Referências.
1. Degradação Ambiental. 2. Análise Multicritério. 3. Geoprocessamento.
I. Título.

CDU 504 (043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**



**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA DETERMINAÇÃO DOS RISCOS À
DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE
CACHOEIRA DOS ALVES, ITAPORANGA-PB**

BANCA EXAMINADORA

Dr^a. Maria de Fátima Fernandes

Examinadora / UFCG

Dr^a. Maria Sallydelândia Sobral de Farias

Examinadora / UFCG

Dr^a. Vera Lúcia Antunes de Lima

Examinadora/ UFCG

Dr^a. Simone Mirtes Araújo Duarte

Examinadora / UFRPE

DEDICO ESTE TRABALHO:

A minha mãe, Luíza Juca, e ao meu pai, João Guimarães (in memória), por tudo, principalmente pelo exemplo de pessoas simples e ao mesmo tempo sábias.

A minha esposa, Cristiane Lemos Viriato, pela dedicação e amor.

As minhas filhas, Iana Viriato Guimarães e Inara Viriato Guimarães, que são duas pérolas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS pela paz concebida, esperança renovada a cada dia e a certeza que ao final do trabalho, o êxito seria alcançado.

Aos meus pais, João Guimarães (in memoriam) e Luíza Juca Guimarães, pessoas extraordinárias, por ter me ensinado desde cedo a lutar pelos meus ideais.

À minha esposa Cristiane Lemos Viriato pelo companheirismo, dedicação e amor recíproco.

Às minhas lindas filhas Iana Viriato Guimarães e Inara Viriato Guimarães, as quais são motivo de alegria e realização.

Aos meus queridos irmãos e irmãs Maria Salete, Antônio Ernandes, José Ernaldo, José Ernildo, Erivaldo, Maria Arlete, Ana Arlete e Hélio Sidney pelas palavras de incentivo, carinho, amizade e a união.

À minha sogra Maria de Lourdes Lemos Viriato e ao meu sogro Francisco Viriato pelo apoio e carinho.

Aos meus cunhados Crislânne Lemos Viriato, Cristina Viriato Campos de Arruda e Francisco Viriato Filho.

Ao meu orientador Dr^o João Miguel de Moraes Neto, pela orientação e apoio necessários ao desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores doutores do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola (doutorado - Irrigação e drenagem) da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em especial: Marx Prestes Barbosa, José Dantas Neto, Vera Antunes de Lima e Maria Sallydelândia Sobral de Farias pelo conhecimento transmitido durante as excelentes aulas.

À professora Dr^a Simone Mirtes e Dr^a Maria de Fátima pela disponibilidade em auxiliar e contribuir com suas relevantes sugestões.

Aos Especialistas que participaram de forma decisiva através da exposição de suas opiniões.

Aos Agentes de saúde do município de Itaporanga - PB pela disponibilidade em contribuir através do fornecimento de dados relativos à população da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS pela paz concebida, esperança renovada a cada dia e a certeza que ao final do trabalho, o êxito seria alcançado.

Aos meus pais, João Guimarães (in memoriam) e Luíza Juca Guimarães, pessoas extraordinárias, por ter me ensinado desde cedo a lutar pelos meus ideais.

À minha esposa Cristiane Lemos Viriato pelo companheirismo, dedicação e amor recíproco.

Às minhas lindas filhas Iana Viriato Guimarães e Inara Viriato Guimarães, as quais são motivo de alegria e realização.

Aos meus queridos irmãos e irmãs Maria Salete, Antônio Ernandes, José Ernaldo, José Ernildo, Erivaldo, Maria Arlete, Ana Arlete e Hélio Sidney pelas palavras de incentivo, carinho, amizade e a união.

À minha sogra Maria de Lourdes Lemos Viriato e ao meu sogro Francisco Viriato pelo apoio e carinho.

Aos meus cunhados Crislânne Lemos Viriato, Cristina Viriato Campos de Arruda e Francisco Viriato Filho.

Ao meu orientador Dr^o João Miguel de Moraes Neto, pela orientação e apoio necessários ao desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores doutores do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola (doutorado - Irrigação e drenagem) da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em especial: Marx Prestes Barbosa, José Dantas Neto, Vera Antunes de Lima e Maria Sallydelândia Sobral de Farias pelo conhecimento transmitido durante as excelentes aulas.

À professora Dr^a Simone Mirtes e Dr^a Maria de Fátima pela disponibilidade em auxiliar e contribuir com suas relevantes sugestões.

Aos Especialistas que participaram de forma decisiva através da exposição de suas opiniões.

Aos Agentes de saúde do município de Itaporanga - PB pela disponibilidade em contribuir através do fornecimento de dados relativos à população da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

Aos funcionários Gilson Lino de Sousa e Maria Aparecida Lima da Silva, pelo exemplo de servidores públicos que são.

Aos amigos, Isnaldo Cândido da Costa, Robi Tabolka dos Santos, Arlington Ricardo, Ricardo de Aragão e Miguel José da Silva pelo conhecimento compartilhado e amizade.

Aos professores e amigos de trabalho do curso de Geoprocessamento do IFPB, Ermano Cavalcante Falcão, Ridelson Farias de Sousa, Sydney de Oliveira Dias, Michele Beppler, Luciene Ferreira Gama, Arnaldo Gomes Gadelha, Marconi Antão dos Santos, Marcello Benigno Borges de Barros Filho pelo incentivo e compreensão.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG pela oportunidade e condições oferecidas para a realização desta pesquisa.

À coordenação do curso de Tecnologia em Geoprocessamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB pela compreensão e apoio para a realização deste trabalho.

RESUMO

A preservação do meio ambiente está condicionada à sustentabilidade dos ecossistemas, sendo fator essencial à qualidade de vida das populações. Os recursos naturais como solo, água e vegetação devem ser explorados de forma adequada utilizando práticas conservacionistas e sob os princípios da sustentabilidade ambiental evitando a degradação das terras. Práticas inadequadas de uso e ocupação do solo têm proporcionado o avanço e a intensificação da degradação ambiental no mundo, e de forma mais severa em regiões semiáridas caracterizando o fenômeno da desertificação das terras. Neste contexto, o trabalho teve como meta a determinação dos riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, localizada no município de Itaporanga-PB com o uso da metodologia de análise multicritério Combinação Linear Ponderada (CLP) baseada nas variáveis declividade, cobertura vegetal, tipo de solo, densidade populacional e proximidades a estradas. Os critérios foram normalizados empregando funções Fuzzy ou lógica nebulosa para unificar as escalas de mensuração antes da sua agregação pela aplicação da CLP. Determinou-se a importância relativa ou pesos referentes a cada critério utilizando o método do Processo Analítico Hierárquico (AHP) através da consulta a um grupo de oito especialistas. Elaborou-se uma base sólida de dados georreferenciados relativa à área de estudo, a qual possibilitou a espacialização do potencial dos riscos à degradação ambiental em quatro classes: muito baixa a baixa, baixa a média, média a alta e alta a muito alta. A consolidação dos dados relativos às respostas dos especialistas determinou a importância relativa de cada critério e sua hierarquização, sendo: cobertura vegetal (46,18%), declividade (26,64%), tipo de solo (16,57%), densidade populacional (6,92%) e proximidade a estradas (3,71%). Com relação aos riscos à degradação ambiental, os estudos mostraram que a bacia hidrográfica em análise possui 1.453,56 ha de área vinculada à classe de médio a muito alto risco à degradação ambiental, 5.479,17 ha na classe baixo a médio, 2.389,48 ha na classe médio a alto e 1.203,70 ha na classe alto a muito alto, correspondendo respectivamente a 13,11%, 49,41%, 21,55% e 10,86% da área total. As áreas com maiores riscos à degradação ambiental, classe alto a muito alto, estão sempre localizadas próximo a alguma fonte hídrica, possuem baixa declividade, alta densidade populacional e baixa cobertura vegetal. Conclui-se, a partir dos resultados, que a utilização de métodos de Avaliação Multicritérios associados às técnicas de Geoprocessamento, é adequada ao mapeamento dos riscos à degradação ambiental, visando o gerenciamento dos recursos naturais e apoio nas tomadas de decisões.

Palavras-chave: Degradação ambiental, Análise multicritério, Geoprocessamento

ABSTRACT

The preservation of the environment is subject to the sustainability of ecosystems, being essential factor to the quality of life of the populations. Natural resources such as soil, water and vegetation should be adequately exploited using conservation practices and under the principles of environmental sustainability while avoiding the degradation of the land. Inadequate practices of land use and occupation has provided the breakthrough and the intensification of environmental degradation in the world, and more severe in semi-arid regions characterizing the phenomenon of desertification of the land. In this context, the work had as its goal the determination of risks the environmental degradation of the river basin of the Waterfall weir of Alves, located in the municipality of Itaporanga-PB with the use of the methodology of multicriteria analysis Combination Weighted Linear (CLP) based on the variables slope, vegetation cover, soil type, population density and proximity to roads. The criteria were normalized using functions or Fuzzy logic conglomeration to unify the scales of measurement before their aggregation by the application of CLP. We determined the relative importance or weight for each criterion using the method of the analytical procedure Hierarchical (AHP) through consultation to a group of eight experts. Has produced a solid base of georeferenced data concerning the area of study, which enabled the spatialisation of potential risks to the environmental degradation in four classes: very low to low, low to medium, medium to high and high to very high. The consolidation of data on the responses of experts determined the relative importance of each criterion and their ranking, being: plant cover (46.18 %), slope (26.64 %), soil type (16.57 %), population density (6.92 %) and proximity to roads (3.71 %). With respect to risks to environmental degradation, the studies showed that the river basin analysis has 1,453.56 ha of area bound by the class of medium to very high risk to environmental degradation, 5,479.17 ha in class low to medium, 2,389.48 ha in class medium to high and 1,203.70 ha in high class a very high, corresponding respectively to 13.11 %, 49.41 %, 21.55 % and 10.86 % of the total area. The areas with the greatest risk to environmental degradation, class high to very high, are always located close to any water source, have low slope, high population density and low vegetation cover. It is concluded from the results that the use of assessment methods multi-criteria associated with the techniques of geoprocessing, and appropriate to the mapping of the risks to environmental degradation, aiming at the management of natural resources and support in making decisions.

Keywords: Environmental degradation, Multicriteria analysis, Geoprocessing

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Bacias Hidrográficas como unidade de gestão	5
3.2 Degradação das Terras	6
3.2.1 Degradação das terras no semiárido nordestino	8
3.2.2 Degradação no Estado da Paraíba	10
3.3 Geoprocessamento.....	11
3.3.1 Sistemas de Informações Geográficas (SIG).....	12
3.4 Escalas de mensuração de dados geográficos.....	15
3.4.1 Escala nominal	16
3.4.2 Escala ordinal	16
3.4.3 Escala de intervalo.....	17
3.4.4 Escala de razão	17
3.5 Análise espacial de dados.....	17
3.5.1 Operações booleanas	17
3.5.2 Fatiamento	18
3.5.3 Reclassificação	18
3.5.4 Ponderação ou atribuição	19
3.6 Sensoriamento remoto.....	19
3.6.1 Georreferenciamento de imagens	21
3.6.2 Técnicas de realce	21
3.6.3 Classificação de imagens	22
3.6.4 Dados SRTM.....	22
3.7 Processo decisório	23
3.7.1 Tipos de decisões.....	24
3.8 Análise multicritério.....	25
3.8.1 Definição dos pesos.....	27
3.8.2 Normalização de critérios - Funções fuzzy	32

3.8.3	Combinação ou agregação de critérios.....	35
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	38
4.1	Localização da área de estudo.....	38
4.2	Características físico-climáticas da área de estudo.....	38
4.2.1	Clima.....	40
4.2.2	Caracterização dos Solos.....	41
4.2.3	Vegetação.....	45
5.	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
5.1	Material.....	47
5.2	Métodos.....	48
5.2.1	Identificação do objetivo.....	51
5.2.2	Definição do grupo de especialistas.....	51
5.2.3	Definição dos critérios.....	51
5.2.4	Padronização ou normalização dos critérios (PI).....	62
5.2.4.1	Crítérios fatores.....	62
5.2.4.2	Crítérios restritivos.....	67
5.2.5	Definição dos pesos (ponderação dos critérios).....	67
5.2.6	Aplicação da Análise Multicritério.....	71
5.2.7	Obtenção do mapa de riscos à degradação ambiental.....	72
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
6.1	Mapas matriciais referentes aos critérios.....	73
6.1.1	Crítérios relativos ou fatores.....	73
6.1.1.1	Declividade.....	73
6.1.1.2	Solo.....	76
6.1.1.3	Cobertura vegetal.....	77
6.1.1.4	Densidade populacional.....	80
6.1.1.5	Proximidade às estradas.....	81
6.1.2	Crítérios restritivos.....	84
6.1.2.1	Rede de Drenagem e açudes.....	84
6.1.2.2	Malha rodoviária.....	85
6.2	Mapas matriciais referentes aos critérios normalizados.....	86
6.2.1	Declividade.....	86
6.2.2	Proximidade a estradas.....	87
6.2.3	Cobertura Vegetal.....	88

6.2.4 Tipo de solo	89
6.2.5 Densidade populacional.....	90
6.3 Ordenação dos critérios e pesos	90
6.4 Mapa de potencial de riscos à degradação ambiental.....	97
7 CONCLUSÕES	102
8 RECOMENDAÇÕES	104
9 REFERÊNCIAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.	5
Figura 2. Situação dos níveis de degradação das terras na Região Nordeste.	10
Figura 3. Principais módulos de um SIG.	13
Figura 4. Representação de dados em SIG.	14
Figura 5. Componentes básicos da representação Vetorial.	14
Figura 6. Operações booleanas intersecção AND e união OR.	18
Figura 7. Operações booleanas intersecção XOR e união NOT.	18
Figura 8. Operação de fatiamento em classes.	18
Figura 9. Operação de reclassificação.	19
Figura 10. Operação de ponderação ou atribuição.	19
Figura 11. Distribuição da cobertura e número de passagens da SRTM.	23
Figura 12. Representação hierárquica do método AHP.	28
Figura 13. Estruturação em etapas do método Delphi.	32
Figura 14. Lógica Booleana.	33
Figura 15. Lógica Fuzzy.	33
Figura 16. Espaço de estratégia de decisão.	37
Figura 17. Localização do manancial no Estado da Paraíba.	38
Figura 18. Ordem da bacia da bacia hidrográfica do Açude Cachoeira dos Alves, Paraíba.	40
Figura 19. Regiões bioclimáticas da área de estudo em contexto estadual.	41
Figura 20. Vegetação da área de estudo no contexto estadual.	46
Figura 21. Fluxograma referente à metodologia adotada.	50
Figura 22. Critérios relativos (fatores) utilizados e suas escalas de mensuração.	51
Figura 23. Mapa pedológico da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.	52
Figura 24. Levantamento de coordenadas (a) e dados descritivos relativos às classes de cobertura vegetal (b) da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.	54
Figura 25. Destaque da carta SB-24-Z-C contendo dados altimétricos da bacia hidrográfica do Açude Cachoeira dos Alves.	55
Figura 26. Disposição de células para o cálculo da declividade.	55
Figura 27. Malha viária e comunidades.	56
Figura 28. Trecho de estrada referente à atualização da malha viária da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.	57
Figura 29. Esquema mostrando o processo de obtenção do mapa de distâncias.	58
Figura 30. Levantamento das coordenadas das residências (a) e informações demográficas (a) relativas à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.	59

Figura 31. Estimador kernel com raio de busca de 1.500m.	59
Figura 32. Residências inseridas na bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves em construção: fase inicial (a) e fase final (b).....	60
Figura 33. Residências em estrutura de taipa, abandonadas a muitos anos (a) e (b).....	61
Figura 34. Residências utilizadas para recreação familiar (a) e momento de lazer de pessoas residentes no município de Itaporanga (b).	61
Figura 35. Vista parcial do açude Cachoeira dos Alves e do rio Cachoeira.	62
Figura 36. Representação gráfica da função fuzzy linear crescente para o critério declividade.....	64
Figura 37. Representação gráfica da função fuzzy linear crescente para o critério influência populacional.	65
Figura 38. Representação gráfica da função fuzzy sigmoidal decrescente.	65
Figura 39. Aplicação do método multicritério combinação linear ponderada célula a célula.....	71
Figura 40. Mapa altimétrico referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.	73
Figura 41. Mapa de declividade referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.	74
Figura 42. Espacialização das classes de relevo referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.	75
Figura 43. Mapa pedológico referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.	76
Figura 44. Carta imagem referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	77
Figura 45. Mapa de classes de cobertura vegetal referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	78
Figura 46. Vegetação densa às margens de rio (a) e semidensa em segundo plano (b). .	79
Figura 47. Classes de vegetação rala (a) e Solo exposto (b).	80
Figura 48. Mapa de localização das residências dentro e no entorno da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	80
Figura 49. Mapa da densidade populacional da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	81
Figura 50. Homens (a) e máquinas (b) trabalhando no asfaltamento do acesso a bacia (PB-382).	82
Figura 51. Mapa da rede viária referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga – PB, destacando o tema pavimentação.	82
Figura 52. Evidências da falta de manutenção na malha viária da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.....	83
Figura 53. Mapa de distância a estradas referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	84

Figura 54. Mapa da rede hidrográfica e açudes referentes à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	85
Figura 55. Mapa da rede viária referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.	86
Figura 56. Mapa de fator relativo ao critério declividades da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	87
Figura 57. Mapa de fator relativo ao critério proximidade a estradas da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	88
Figura 58. Mapa de fator relativo ao critério cobertura vegetal da bacia hidrográfica. ..	89
Figura 59. Mapa de fator relativo ao critério tipo de solo da bacia hidrográfica.	89
Figura 60. Mapa de fator relativo ao critério densidade populacional da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.....	90
Figura 61. Composição dos pesos referentes apenas aos critérios definidos para cada uma das cinco posições no rank.	96
Figura 62. Composição dos critérios e seus respectivos pesos.	97
Figura 63. Modelagem da árvore de decisão para o potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.	98
Figura 64. Mapa da distribuição espacial do potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB.....	99
Figura 65. Detalhe da posição geográfica onde se localiza as maiores declividades da bacia hidrográfica.	100
Figura 66. Mapa de classes referente ao potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características de Órbita dos Satélites Landsat	20
Tabela 2. Características do sensor TM/Landsat 5	20
Tabela 3. Valores atribuídos a RI correspondente ao número de critério.	31
Tabela 4. Características físicas da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Paraíba.	39
Tabela 5. Ponderação para as classes de cobertura vegetal realizada pelos especialistas.	63
Tabela 6. Associação entre as classes de cobertura vegetal e valores normalizados.	63
Tabela 7. Ponderação dos tipos de solo realizada pelos especialistas.	66
Tabela 8. Associação entre os tipos de solo e valores normalizados.	67
Tabela 9. Matriz de comparação pareada.	68
Tabela 10. Classes de declividade de acordo com a classificação da EMBRAPA.	75
Tabela 11. Classificação e quantificação dos solos da bacia.....	77
Tabela 12. Classes de cobertura vegetal.	79
Tabela 13. Áreas ocupadas referentes aos açudes e rios.	85
Tabela 14. Questionário respondido pelo especialista 1.....	91
Tabela 15. Questionário respondido pelo especialista 2.....	91
Tabela 16. Questionário respondido pelo especialista 3.....	92
Tabela 17. Questionário respondido pelo especialista 4.....	92
Tabela 18. Questionário respondido pelo especialista 5.....	93
Tabela 19. Questionário respondido pelo especialista 6.....	93
Tabela 20. Questionário respondido pelo especialista 7.....	94
Tabela 21. Questionário respondido pelo especialista 8.....	94
Tabela 22. Resultado das Preferências individuais dos especialistas (AHP).	95
Tabela 23. Resultado das Preferências do grupo de especialistas.	96
Tabela 24. Determinação das áreas relativas às classes de potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB.	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Escala de comparação de critérios.	29
Quadro 2. Escala fundamental de Saaty.....	30
Quadro 3. Principais funções Fuzzy.....	34
Quadro 4. Classes de Cobertura vegetal definidas para a bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.	53
Quadro 5. Classes de riscos à degradação ambiental.	72

LISTA DE SIGLAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas;
AHP – Analytic Hierarchy Process;
AMC – Avaliação MultiCritério;
ASI - Agenzia Spaziale Italiana;
CAGEPA – Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba;
CI - Consistency Index;
CLP – Combinação Linear Ponderada;
CR - Consistency Ratio;
DZLR - Deutsche Zentrum fur Luftund Raumfhart;
DER – Departamento de Estradas e Rodagem;
EMATER – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural;
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
EUA – Estados Unidos da América;
GPS – Global Positioning System;
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis;
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba;
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;
MCAD – Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão;
MDE – Modelo Digital de Elevação;
MMA – Ministério do Meio Ambiente;
MNT – Modelo Numérico do Terreno;
MPO - Média Ponderada Ordenada;
NASA – National Aeronautics and Space Administration;
NINA - National Imaging and Mapping Agency;
O – Oeste;
PB – Paraíba;
PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos;
PI – Plano de Informação;
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente;
RI - Random Index;
S – Sul;

SAR - Radar de Abertura Sintética;

SIG – Sistema de Informação Geográfica;

SIRGAS – Sistema de Referencial Geocêntrico para as Américas;

SGBD – Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados;

SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission;

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste;

TB – TeraByte;

TM – Thematic Mapper;

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande;

UFPB – Universidade Federal da Paraíba;

UFSE – Universidade Federal de Sergipe;

UM – Unidade de Mapeamento;

UNCCD – Convenções das Nações Unidas de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca;

UTM – Universal Transverse Mercator;

WGS – World Geodetic System.

1. INTRODUÇÃO

O modo inadequado e irracional de convivência do homem para com o meio ambiente principalmente na região semiárida do nordeste brasileiro tem provocado degradação do meio ambiente. A redução de sua biodiversidade, com a conseqüente degradação dos solos, por meio do processo de erosão e perda de fertilidade, resulta da eliminação da cobertura vegetal, total ou parcial, em associação com o uso inadequado do solo, aliada às condições climáticas desfavoráveis.

Atividades humanas, como desmatamentos e queimadas, representam fatores degradantes diretos, a partir dos quais a vegetação natural dá lugar à pastagem, ao cultivo agrícola e a outros fins, proporcionando grandes alterações no meio ambiente, desconsiderando-se a capacidade de suporte e aptidão dos recursos naturais dessa região e intensificando o processo de degradação das terras.

Essas condições de exploração do bioma Caatinga têm motivado a comunidade científica e, em menor grau, os gestores públicos ao desenvolvimento de estudos e projetos com propósito de mitigar o avanço desse processo nas terras semiáridas.

Nessa perspectiva, observa-se a necessidade do planejamento das ações contemplando o nível de aptidão e as limitações do ambiente considerado, de modo a atingir metas específicas, a partir de diagnósticos que identifiquem e definam a utilização mais apropriada do espaço geográfico em estudo. Um planejamento que busque as melhores alternativas, partindo do conhecimento das características dos recursos naturais existentes, propiciando que estes sejam explorados de forma racional, mantendo-se as suas características naturais e a sua capacidade de produção econômica e sustentável.

As condições para que se desenvolvam o planejamento da destinação de uso e ocupação de uma unidade ambiental, exigem um conhecimento racional de suas vulnerabilidades. O mapeamento destas deve considerar a região em estudo como um sistema composto por diferentes variáveis (critérios) que se inter-relacionam, muitas em nível conflitantes, e, por estas características, exige análise criteriosa, tornando-se um complexo problema de apóio à tomada de decisão.

Dessa forma, uma avaliação multicritério utiliza alguns procedimentos de avaliação e combinação de diversos critérios para o alcance de um determinado

objetivo. Para tanto, é feito um equacionamento no qual constam os fatores a serem considerados os pesos dados a esses fatores e uma hierarquização entre eles.

Alguns sistemas de apoio a decisão têm sido desenvolvidos ou adaptados para operar em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), potencializando a capacidade destes de análise de dados de natureza espacial.

As geotecnologias em conjunto com as técnicas de análise multicritério permitem que se mapeiem inúmeras variáveis e delas se extraiam alternativas viáveis para um problema, fornecendo informações que apoiem as tomadas de decisão na busca de alternativas sustentáveis de uso do solo.

Uma unidade de planejamento para ocupação socioeconômica e gerenciamento ambiental cada dia mais utilizada por especialistas e ambientalistas é a bacia hidrográfica. Esta área é ideal para programação do uso e manejo dos recursos naturais, pois a utilização, preservação e recuperação desses recursos devem ser realizadas de maneira integrada considerando que nessa unidade observam-se a integração do ambiente físico natural com os processos antrópicos atuantes.

A bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves está inserida dentro da grande bacia Estadual do Rio Piancó, localizada na região Oeste do Estado da Paraíba, contemplando partes dos municípios de Itaporanga e São José do Caiana, tendo sua economia essencialmente baseada na pecuária de autoconsumo e agricultura familiar.

Estudos realizados por Sousa (2007) mostraram que apesar do alto risco de degradação das terras, nas encostas das serras que compõem a bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, o homem destruiu a cobertura vegetal para implantação de agricultura de autoconsumo e pastagens. O autor ainda observa que neste local as queimadas são práticas bastante frequentes e o problema é tão crítico que numa mesma encosta nitidamente a paisagem se diferencia em níveis de degradação graves e baixos.

A fonte de água necessária para sustentabilidade ambiental e econômica da bacia está baseada essencialmente no açude Cachoeira dos Alves, sendo que estudos batimétricos realizados na bacia hidráulica deste reservatório mostraram que a capacidade de acumulação hídrica foi reduzida em $1.775.833 \text{ m}^3$, o que corresponde a um percentual de assoreamento de 16,74% em um período de 22 anos (1984 a 2006). Este assoreamento aponta para uma taxa de 0,76% ao ano, superior a média brasileira (GUIMARÃES, 2007).

A ocorrência de um grande volume de sedimentos transportados e depositados no leito do açude indica práticas inadequadas no uso dos recursos naturais da bacia hidrográfica o que compromete a qualidade de vida de seus habitantes e sua sustentabilidade ambiental.

Desta forma, a determinação das classes referentes aos riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves é de grande importância no planejamento e gerenciamento da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, possibilitando que o direcionamento de ações adote um modelo de desenvolvimento balizado não apenas em critérios econômicos, mas, principalmente, levando em consideração aspectos sociais e ambientais de preservação e conservação do meio ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar o potencial dos riscos a degradação ambiental referente à bacia hidrográfica do reservatório Cachoeira dos Alves, localizado no município de Itaporanga-PB, utilizando metodologias multicritério em Apoio à Decisão (MCAD) e técnicas de geoprocessamento.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a variabilidade espacial da declividade através do processamento dos dados altimétricos do projeto Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM;
- Caracterizar a cobertura vegetal através da classificação supervisionada;
- Atualizar o levantamento existente da malha viária (estradas vicinais) através do posicionamento por satélites;
- Determinar a variabilidade espacial da densidade populacional;
- Definir os pesos correspondentes aos critérios através da opinião do grupo de especialistas;
- Agregar os fatores aplicando o método da combinação linear ponderada (CLP).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Bacias Hidrográficas como unidade de gestão

Até a década de 1970, os resultados da ação humana sobre o meio ambiente eram vistos sob a ótica estrita da escala local, como em trechos de rios e áreas agrícolas. Atualmente, os problemas ambientais começam a ser considerados na escala da bacia hidrográfica e até em nível regional e global (RUHOFF, 2004).

Para Villela e Mattos (1975), a bacia hidrográfica é controlada por um divisor, assim designado por ser uma linha de separação que divide as precipitações que caem em bacia vizinhas e que encaminha o escoamento superficial resultante para um ou outro sistema fluvial, cujo divisor segue uma linha rígida em torno da bacia, atravessando o curso d'água somente no ponto de saída (Figura 1).

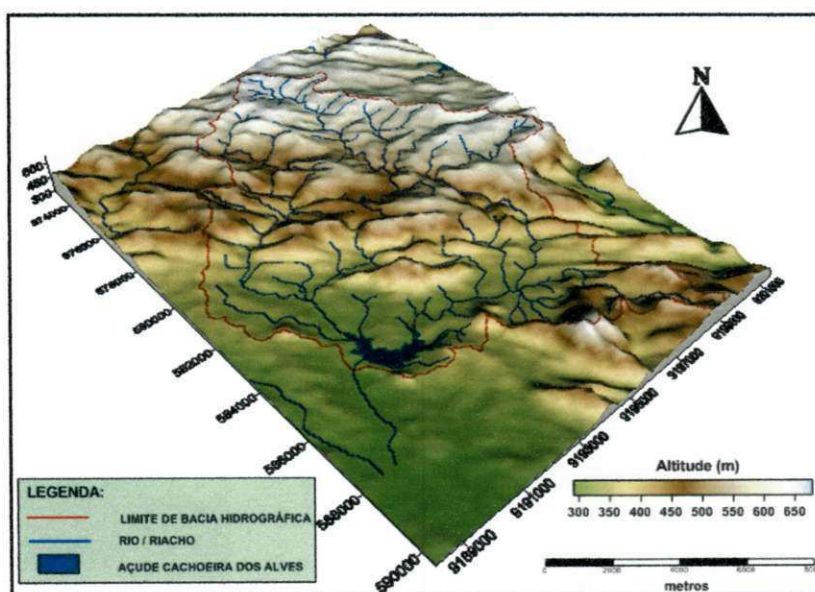


Figura 1. Representação da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.
Fonte: adaptado de Guimarães, 2007

Segundo Napoleão (2003), a adoção da bacia hidrográfica com unidade de planejamento e gestão é de aceitação internacional, esse recorte espacial constitui uma unidade física bem caracterizada, tanto do ponto de vista da integração como da funcionalidade de seus elementos, mas também porque não há qualquer área que não se integre a uma bacia.

De acordo com a Política Nacional dos Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), instituída pela Lei nº 9.433/1997, que incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos, adota a definição de bacia hidrográfica como unidade de estudo e gestão ambiental, constituindo

um sistema físico cujo volume de entrada e de saída de água irá determinar o seu balanço hídrico.

A bacia hidrográfica é considerada uma unidade de planejamento, portanto, impõe abordar todos seus elementos (água, solo, flora, fauna, uso e ocupação do solo, por exemplo) e compreendê-la como uma totalidade composta por elementos naturais e sociais, inter-relacionados e dinâmicos.

O gerenciamento de bacia hidrográfica implica, necessariamente, o gerenciamento de recursos hídricos, de acordo com Assis (PINHEIRO, 2008). A adoção da bacia hidrográfica, nesta perspectiva, pode contribuir de forma significativa para a integração do sistema de gestão ambiental com o sistema de gestão dos recursos hídricos.

Para Fernandes et al (2005), a degradação ambiental ocorrida nas bacias hidrográficas é causada principalmente por atividades antrópicas, sem o uso racional dos recursos naturais, principalmente do solo, água e cobertura vegetal, tem gerado sérios problemas, tanto de ordem qualitativa quanto quantitativa, aos cursos d' água.

3.2 Degradação das Terras

Degradação da terra é a redução ou a perda da produtividade biológica ou econômica, bem como da complexidade das terras agrícolas irrigadas ou não, das pastagens, bosques e terras com vegetação nativa, em zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas causada pelos sistemas de utilização da terra ou por um processo ou uma combinação de processos, incluídos os resultantes de atividades humanas (UNCCD, 2007).

A Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca-UNCCD define a desertificação como um processo que culmina com a degradação das terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, como resultado da ação de fatores diversos, com destaque para as variações climáticas e as atividades humanas (UNCCD, 2007).

A degradação das terras e a desertificação constituem graves problemas. Tais problemas incidem sobre 33% da superfície da terra, onde vivem cerca de 2,6 bilhões de pessoas (42% da população total) em que se estima que se percam anualmente 24 bilhões de toneladas da camada arável do solo, o que afeta negativamente a produção agrícola e o desenvolvimento sustentável das regiões impactadas (MMA, 2007).

Historicamente, dois acontecimentos impactantes marcaram o início dos estudos pela comunidade científica e as preocupações pelos gestores públicos relacionados à degradação das terras e a desertificação.

O primeiro evento foi a extensão e severidade das secas, particularmente, durante os anos de 1934 e 1936, que afetou uma área de 380.00 km² nos Estados Unidos e representou o marco comparativo para a ocorrência desse fenômeno até hoje (BRASIL, 2005).

O segundo acontecimento ocorreu durante o período 1967 a 1976, uma seca de grandes proporções atingiu a Região do Sahel, abaixo do Deserto do Saara, onde mais de 200 mil pessoas e milhões de animais morreram de fome (BRASIL, 2005).

Esses dois fenômenos colocaram, definitivamente, em pauta a preocupação com a “desertificação” na agenda política internacional. A comunidade internacional passou a observar a situação dramática das populações de diferentes países

Na América Latina, mais de 516 milhões de hectares são afetados pela desertificação. Como resultado desse processo, se perdem 24 bilhões de toneladas por ano da camada arável do solo, o que afeta negativamente a produção agrícola e o desenvolvimento sustentável (PANBRASIL, 2004).

As causas e, ao mesmo tempo, as conseqüências da degradação das terras e da desertificação são, freqüentemente associados á pobreza e a insegurança alimentar combinadas com variações severas do ciclo hidrológico, como secas e enchentes.

A desertificação ou degradação das terras é o resultado da destruição da base dos recursos naturais (ação do homem sobre o seu ambiente) associado a fenômenos naturais como a variabilidade climática.

Após estes acontecimentos são realizadas várias conferências objetivando delinear o problema e encontrar soluções.

Lima (2005) lista cronologicamente estes eventos:

Estocolmo, Suécia, em 1972, nesta Conferência, foram discutidos inúmeros temas relativos ao meio ambiente, incluindo a catástrofe africana e os decorrentes problemas de desertificação. Durante a Conferência de Estocolmo (onde se instituiu o Dia Mundial do Meio Ambiente - 5 de junho) foi constatada a necessidade de um evento específico para tratar o problema da desertificação.

Nairobi, Kênia, esta Conferência teve um papel fundamental em todo o processo de luta contra a desertificação no mundo, mostrando que os recorrentes problemas de

pobreza e meio ambiente necessitavam de um enfrentamento direto pela comunidade internacional.

Rio de Janeiro, Brasil, em 1992, na Cúpula Mundial da Terra, ou RIO 92, as autoridades participantes desta Cúpula solicitaram à Assembléia Geral das Nações Unidas que fosse preparada a Convenção de Combate à Desertificação.

O texto da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação – UNCCD foi finalizado em 17 de junho de 1994, e a Convenção entrou em vigor em dezembro de 1996.

3.2.1 Degradação das terras no semiárido nordestino

As áreas suscetíveis à desertificação no Brasil abrangem municípios dos nove estados do Nordeste: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Além destes, também foram considerados alguns municípios no Norte de Minas Gerais e Espírito Santo, onde a Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE executou Programas de Emergência de Seca, e municípios onde o bioma caatinga ocorre (BRASIL, 2004).

Durante a Rio-92, vários países com problemas de desertificação propuseram à Assembléia Geral que aprovasse a negociação de uma Convenção Internacional sobre o tema. A Assembléia Geral aprovou a negociação da Convenção, que foi realizada a partir de janeiro de 1993 e finalizada em 17 de junho de 1994, data que se transformou no Dia Mundial de Luta contra a Desertificação.

A região Nordeste do Brasil ocupa uma área de 1.539.000 km², correspondente a 18% do território brasileiro. Cerca de 57% do território nordestino - 882.000 km² - corresponde à zona semiárida, castigada periodicamente por secas (DUARTE, 2002).

A principal causa da degradação das terras das zonas áridas está associada ao uso inapropriado dos recursos naturais, agravados pelas secas. Isto ocorre num contexto onde: as populações das regiões semiáridas estão entre as mais pobres do mundo; as tecnologias utilizadas não se adequar, em muitos casos, às restrições de recursos naturais características dessas áreas; a inserção das regiões secas aos mercados nacionais e internacionais vem estimulando a super-exploração dos recursos dentro de sistemas produtivos tradicionais e com baixo nível tecnológico (GARCIA, 2004).

De acordo com a Convenção das nações Unidas para o Combate à Desertificação, as áreas susceptíveis á desertificação são aquelas de clima árido,

semiárido e subúmido seco. Conforme a definição aceita internacionalmente, o Índice de Aridez, definido como a razão entre a Precipitação e a Evapotranspiração Potencial, estabelece as seguintes classes climáticas:

- *hiperárido* $< 0,03$
- *árido* $0,03 - 0,20$
- *semiárido* $0,21 - 0,50$
- *sub-úmido seco* $0,51 - 0,65$
- *Subúmido úmido* $> 0,65$

Este índice foi utilizado para o estabelecimento das áreas de risco e para a elaboração do Atlas Mundial da Desertificação, publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA e que serve como parâmetro em todo o mundo.

No Brasil, as áreas em riscos à desertificação são aquelas que correspondem às regiões semiárida e sub-úmida seca, localizadas em sua grande maioria na região nordeste e no norte do Estado de Minas Gerais. A susceptibilidade à degradação das terras, no Brasil, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente - MMA a partir de trabalho realizado pelo Centro de Sensoriamento Remoto do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, determinou três categorias de susceptibilidade: Alta, Muito Alta e Moderada. As duas primeiras referem-se respectivamente às áreas áridas e semiáridas definidas pelo índice de aridez. A terceira é resultado da diferença entre a área do Polígono das Secas e as demais categorias. Assim, de um total de 980.711,58 km² de áreas, 238.644,47 km² são de susceptibilidade Muito Alta, 384.029,71 km² são de susceptibilidade Alta e 358.037,40 km² são moderadamente susceptíveis (MMA, 2007).

A Situação dos níveis de degradação das terras na região Nordeste (Figura 2) indica que a área afetada de forma Muito Grave é de 98.595 km², 10% do semiárido e as áreas afetadas de forma Grave atingem 81.870 km², 8% do território (MMA, 2007).

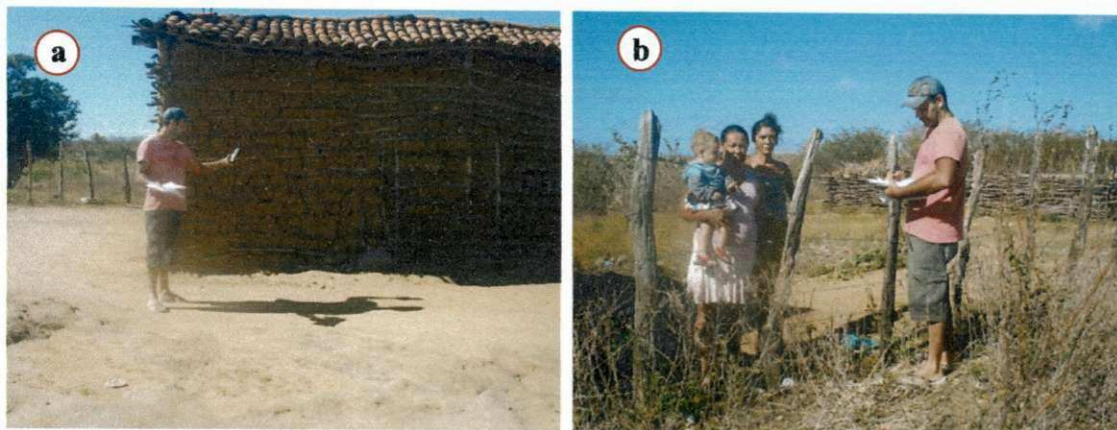


Figura 30. Levantamento das coordenadas das residências (a) e informações demográficas (a) relativas à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

Após o levantamento de todas as residências localizadas dentro da bacia hidrográfica e no seu entorno (correção do efeito de borda) foi possível elaborar um mapa de superfície de densidade, gerada para a variável população, representando a densidade populacional, em que se utilizou o método de densidade kernel. Esta técnica utiliza o estimador kernel para criar uma superfície de densidade possibilitando determinar áreas com alta e baixa densidade populacional, ou seja, a variabilidade espacial do atributo população.

O estimador kernel utiliza um algoritmo, em que as entradas são: uma área de pesquisa circular em torno de cada amostra (residência), definida pelo comprimento de seu raio; e a resolução da imagem matricial de saída, sendo adotados para este trabalho, os valores 1500m e 30m, respectivamente (Figura 31).

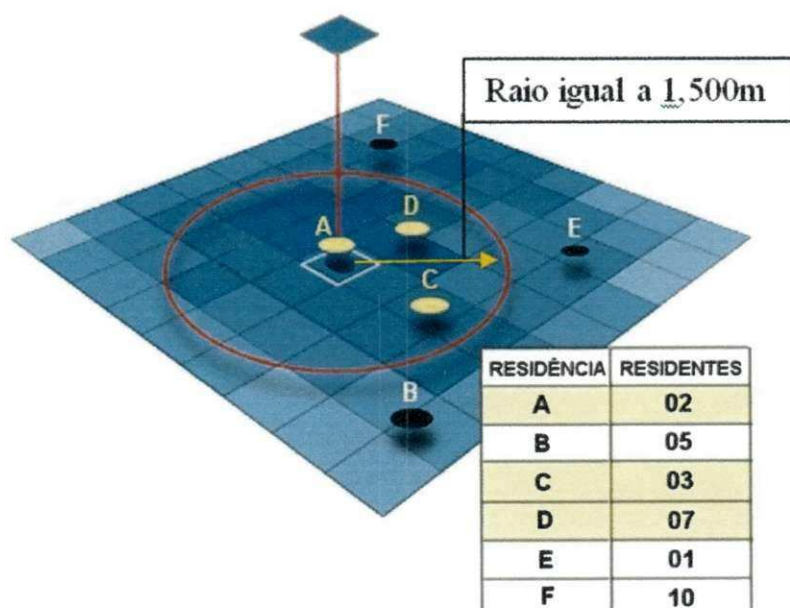


Figura 31. Estimador kernel com raio de busca de 1.500m.
Fonte: Adaptado ESRI (2000).

No caso representado na Figura 31, serão considerados pelo estimador kernel, apenas os residentes pertencentes às casas A, C e D; uma vez que se esses imóveis encontram-se inseridos na área definida pelo raio de busca de 1.500m.

O tamanho do raio de pesquisa afeta o resultado de um cálculo de densidade, de modo, que valores elevados produzem superfícies mais suaves por abranger mais pontos de dados.

O valor resultante do processamento do estimador kernel é então atribuído a cada célula e pode ser interpretado como a influência populacional naquela área, pois embora, não haja residências neste local, o dinamismo desta variável no tempo e espaço compromete diretamente sua vizinhança ou entorno.

A complexidade na análise deste critério está relacionada diretamente a necessidade de deslocamento das pessoas gerando fluxo migratório de curto e longo período, característica de toda população.

Há, na bacia hidrográfica, fluxo migratório no sentido de fora para dentro, caso em que foram mapeadas as residências em construção (Figura 32), mas como na data da realização do levantamento, ainda não havia moradores, considerou-se para a quantidade de habitantes o valor zero.

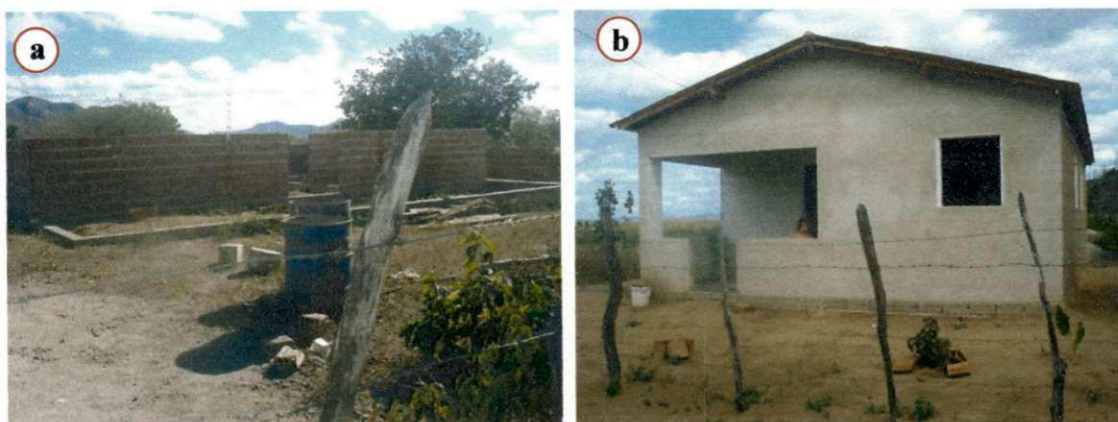


Figura 32. Residências inseridas na bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves em construção: fase inicial (a) e fase final (b).

Também foi considerado valor zero para população relativa às residências caracterizadas como abandonadas, embora, todas fossem mapeadas (Figura 33).

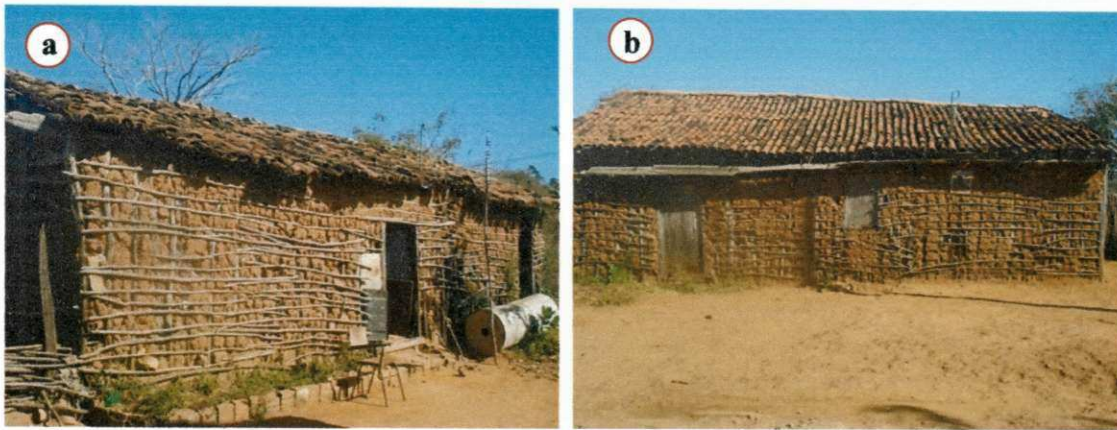


Figura 33. Residências em estrutura de taipa, abandonadas a muitos anos (a) e (b).

Outro ponto bastante complexo, é que parcela da população mora na zona urbana (fora da bacia hidrográfica), mas possui residências localizadas dentro da bacia hidrográfica, principalmente, próximas ao açude Cachoeira dos Alves utilizadas (Figura 34), apenas nos fim de semanas para lazer. Neste caso específico, embora na data da visita de campo não houvesse moradores, os mesmo foram considerados como residentes permanentes, por entender ser relevante considerar estas pessoas na contagem populacional.

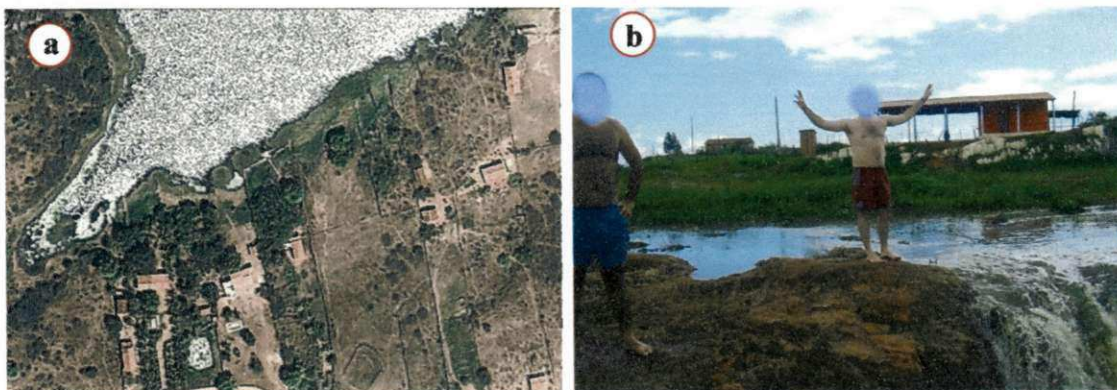


Figura 34. Residências utilizadas para recreação familiar (a) e momento de lazer de pessoas residentes no município de Itaporanga (b).

5.2.3.2 Critérios restritivos

Foram definidas como restrições, para o propósito deste trabalho, as áreas dos espelhos d'água dos açudes, a rede hidrográfica e a malha viária, ou seja, todas as áreas onde não faz sentido qualquer tipo de avaliação para o objetivo proposto.

- **Rede hidrográfica - Drenagem e açudes**

As áreas ocupadas por rios, riacho e açudes, Figura 35, foram excluídas da avaliação do potencial de riscos à degradação ambiental.

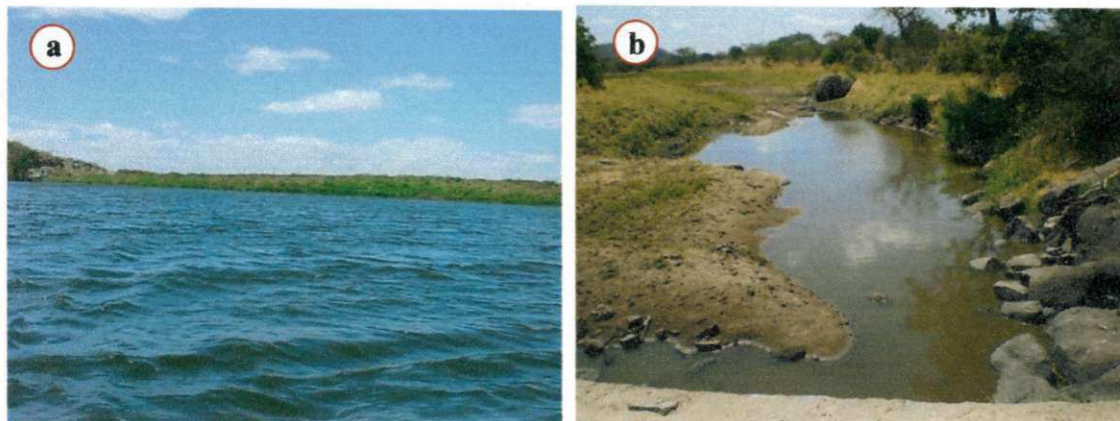


Figura 35. Vista parcial do açude Cachoeira dos Alves e do rio Cachoeira.

Na construção do mapa relativo a este critério restritivo, realizou-se uma rasterização no plano de informação vetorial dos rios, riachos e açudes.

- **Malha viárias - estradas**

O mesmo procedimento foi adotado às áreas pertencentes à malha viária para obtenção do mapa de restrição concernente às estradas.

5.2.4 Padronização ou normalização dos critérios (PI)

A padronização foi necessária devido ao fato dos fatores apresentarem escalas de mensuração classificadas como qualitativa e quantitativa do tipo nominal e intervalar. A padronização faz com que os fatores sejam levados a uma unidade comum de medida numa escala de mensuração quantitativa do tipo ordinal permitindo a realização de comparações entre os critérios e sua agregação pela aplicação do método multicritério da combinação linear ponderada.

5.2.4.1 Critérios fatores

Após a definição dos critérios relativos e restritivos e sua posterior rasterização, o passo seguinte foi a normalização dos planos de informações referentes

aos critérios relativos ou fatores, de acordo com uma escala padrão de 8 bits, variando de 0 a 255 bytes, comum a todos os critérios.

Para os critérios de natureza quantitativa foram utilizadas funções fuzzy na sua normalização, enquanto que, para os critérios qualitativos usou-se o processo de associação com valores de cada classe definido por especialistas. Nesta fase, de normalização dos critérios, foi adotada uma resolução espacial de 10m para todos os critérios.

- **Fator cobertura vegetal**

Este critério possui uma escala de mensuração de dados qualitativa (classes: vegetação densa, vegetação semidensa, vegetação rala, solo exposto e espelho d'água), logo foi feita uma conversão para uma escala quantitativa com valores ponderados pelos especialistas utilizando uma escala de 0 a 100% (Tabela 5).

Tabela 5. Ponderação para as classes de cobertura vegetal realizada pelos especialistas.

Identificador	Classes de cobertura vegetal	Pesos
1	Solo exposto	55.59
2	Vegetação rala	30.80
3	Vegetação semidensa	10.51
4	Vegetação densa	3.10

A normalização da cobertura vegetal foi realizada mediante uma associação entre os valores correspondentes aos pesos relativos às várias classes de cobertura vegetal e os valores numéricos de 0 a 255.

A classe solo exposto contribui de forma mais intensa para degradação ambiental que as outras. Logo, adotou-se para esta o valor 255, enquanto que, aquela que menos contribui é a vegetação densa, sendo a ela, atribuído o valor mínimo (zero). As outras classes compreendidas entre estes limites receberam valores, seguindo uma proporção linear aos seus respectivos pesos (Tabela 6).

Tabela 6. Associação entre as classes de cobertura vegetal e valores normalizados.

Identificador	Classes de cobertura vegetal	Peso (%)	Valor normalizado
1	Solo exposto	55.59	255
2	Vegetação rala	30.80	135
3	Vegetação semidensa	10.51	36
4	Vegetação densa	3.10	0

- **Fator declividade**

O critério declividade foi normalizado utilizando uma função fuzzy linear crescente (Figura 36), cujos limites adotados foram: o valor mínimo (zero) e máximo (83%) encontrados na bacia hidrográfica. Neste sentido, quanto maior a declividade (áreas mais íngremes) maior será seu potencial de riscos à degradação ambiental, e, portanto, maiores serão os valores na escala padrão do mapa deste fator. Ao contrário, menores valores de declividade proporcionarão menores riscos à degradação ambiental.

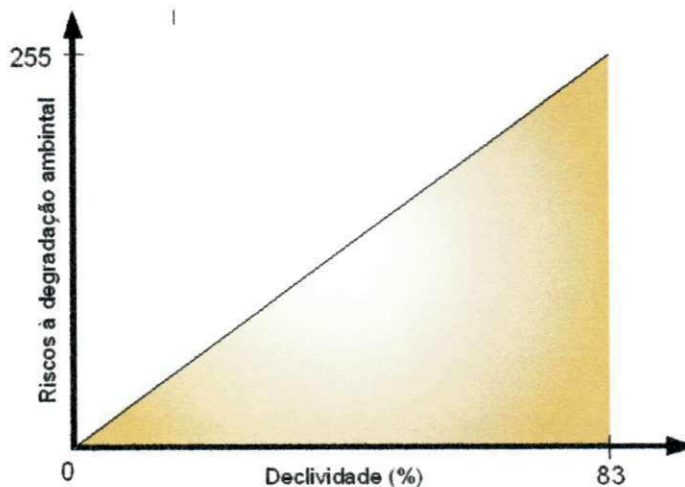


Figura 36. Representação gráfica da função fuzzy linear crescente para o critério declividade

- **Fator densidade populacional**

A densidade populacional foi normalizada utilizando também a função fuzzy linear crescente com pontos limites de zero e 57,56; respectivamente para o mínimo e máximo (Figura 37), dessa forma, quanto maior a densidade populacional, mais elevado serão os valores na escala padrão relativos ao potencial dos riscos à degradação ambiental. Os menores valores, observados na escala padrão forma associados às áreas poucos habitadas.

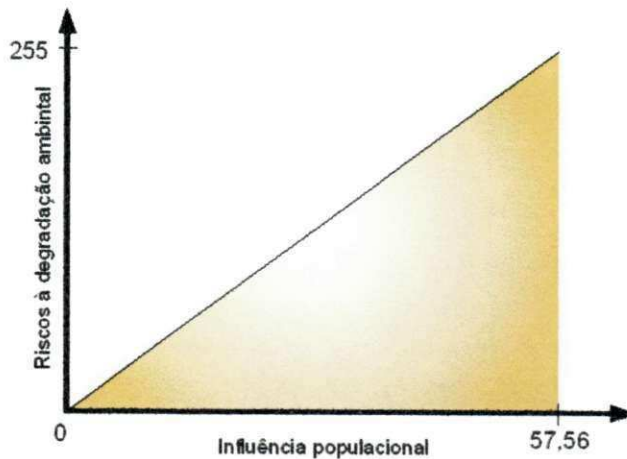


Figura 37. Representação gráfica da função fuzzy linear crescente para o critério influência populacional.

- **Fator proximidade às estradas**

O critério proximidades a estradas foi padronizado, utilizando uma função fuzzy sigmoidal decrescente (Figura 38), de maneira que, quanto mais distantes as áreas estiverem das estradas, menores serão os riscos à degradação ambiental atribuída a estes locais.

A função sigmoidal é aquela que melhor se ajusta a este critério, pois se considera que somente as áreas próximas as estradas (limite adotado foi uma distância de 80m) possuem elevado potencial de riscos à degradação ambiental. A partir desta distância limite de 80m, os valores atribuídos aos riscos à degradação ambiental caem bruscamente até o outro ponto limite de 750m, de modo que distâncias superiores a este limite, praticamente não produzirão riscos ao meio ambiente, ou seja, a função fuzzy foi aplicada no intervalo de 80m a 750m.

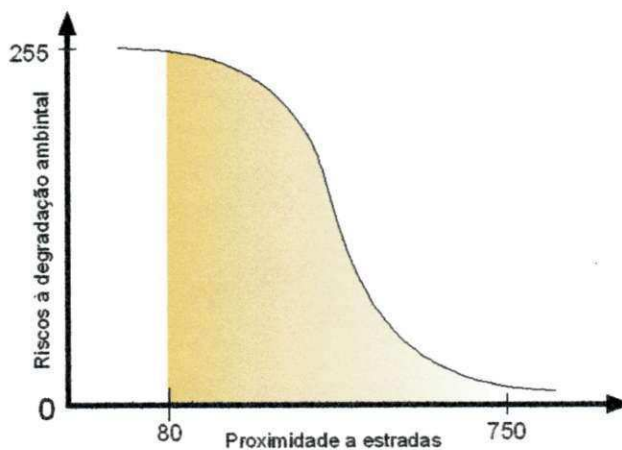


Figura 38. Representação gráfica da função fuzzy sigmoidal decrescente.

- **Fator tipo de solo**

A obtenção do critério cobertura vegetal, foi possível por meio de uma conversão para uma escala quantitativa com valores ponderados pelos especialistas utilizando uma escala de 0 a 100%, pois o critério tipo de solo possui uma base de dados qualitativos.

Esse critério foi o mais difícil de ser ponderado pelos especialistas, uma vez que exigiu profundo conhecimento de pedologia, característica esta que nem todos possuíam.

Apenas três especialistas compararam e ponderaram os tipos de solo da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves (Tabela 7).

Tabela 7. Ponderação dos tipos de solo realizada pelos especialistas.

Identificador	Tipo de solo	Pesos (%)
1	Luvissolos hipocrômico órtico (TPo)	38,37
2	Neossolos litólicos eutróficos (RLe)	33,65
3	Argissolos vermelho amarelo eutrófico (PVAe)	21,03
4	Nitossolos vermelhos	3,98
5	Neossolos flúvicos (Ae3)	2,97

A normalização foi realizada mediante uma associação entre os valores correspondentes aos pesos relativos aos tipos de solo e os valores numéricos de 0 a 255 da escala padrão.

De acordo com os especialistas, os tipos de solo que proporcionam maiores riscos à degradação ambiental são Luvissolos Hipocrômico Órtico, Neossolos Litólicos Eutróficos e Argissolos Vermelho Amarelo Eutrófico. Enquanto que os solos classificados como Nitossolos Vermelhos e Neossolos Flúvicos foram ponderados com os menores valores indicando baixo potencial de risco à degradação.

Sendo assim, o tipo de solo Luvisolo Hipocrômico Órtico contribui mais intensamente para degradação ambiental que os outros. Logo, adotou-se para este o valor 255, enquanto que, aquele que menos contribui corresponde ao solo Neossolo Flúvico, sendo atribuído o valor mínimo (zero). Os outros tipos de solos compreendidos entre estes limites receberam valores, seguindo uma proporção linear aos seus respectivos pesos (Tabela 8).

Tabela 8. Associação entre os tipos de solo e valores normalizados.

Identificador	Tipo de solo	Pesos (%)	Valores normalizados
1	Luvisolos hipocrômico órtico (TPo)	38,37	255
2	Neossolos litólicos eutróficos (RLe)	33,65	221
3	Argissolos vermelho amarelo eutrófico (PVAe)	21,03	130
4	Nitossolos vermelhos	3,98	7
5	Neossolos flúvicos (Ae3)	2,97	0

5.2.4.2 Critérios restritivos

Para os critérios restritivos, gerou-se uma imagem booleana convencionado da seguinte forma: o valor 0 (zero) foi atribuído aos pixels correspondentes às áreas onde não se admite a possibilidade de qualquer tipo de avaliação dos riscos à degradação ambiental (açudes, rios e estradas) e o valor 1 (um) às áreas onde esta estimativa torna-se possível.

5.2.5 Definição dos pesos (ponderação dos critérios)

Os critérios fatores foram ponderados utilizando a metodologia do Processo Analítico Hierárquico – AHP, cuja característica é comparar os fatores aos pares.

Na avaliação da importância relativa dos fatores, foi empregada a Técnica Delphi, apoiada pela Matriz de Comparação Pareada (AHP).

A determinação dos pesos utilizando o método AHP segue a seguinte rotina de cálculo (RAMOS, 2000):

- Construção da matriz de julgamento;
- Cálculo do autovetor (eigenvalue) principal;
- Cálculo do máximo autovalor (eigenvalue);
- Cálculo do Índice de Consistência (CI-Consistency Index);
- Cálculo do Índice de Aleatoriedade (RI-Random Index);
- Cálculo da Razão de Consistência (CR-Consistency Ratio)
- Reavaliação dos julgamentos da matriz caso CR supere o valor 0.1.

- **Construção da matriz de julgamento**

O método AHP fundamenta-se numa matriz quadrada ($n \times n$) de comparação relativas entre os n critérios (fatores), onde as linhas e as colunas da matriz correspondem aos critérios avaliados (RAMOS, 2000).

A Tabela 9 representa um julgamento hipotético, apenas para ilustração, de um especialista.

Tabela 9. Matriz de comparação pareada.

CRITÉRIOS	Declividade	Densidade populacional	Tipo de solo	Cobertura vegetal	Proximidade a estradas
Declividade	1	5	3	7	9
Densidade populacional	1/5	1	1/3	4	5
Tipo de solo	1/3	3	1	6	7
Cobertura vegetal	1/7	1/4	1/6	1	2
Proximidade a estradas	1/9	1/5	1/7	1/2	1

A definição dos valores de importância relativa entre os critérios determina os dados de entrada na matriz de comparação pareada e, a partir deles são calculados os pesos ponderados dos fatores e a consistência do julgamento da matriz (CÂMARA, MONTEIRO e MEDEIROS, 2001).

Cada componente do grupo de especialistas faz seu julgamento comparando os critérios aos pares, de acordo com a escala fundamental de Saaty (Quadros 1 e 2) preenchendo a parte superior da matriz.

- **Cálculo do vetor principal**

Saaty (1980) mostrou que o autovetor resultante do máximo autovalor da matriz A (matriz de comparação pareada) traduz a prioridade dos fatores e preserva a preferência ordinal entre as alternativas representando os pesos referentes a cada critério.

$$w_i = \begin{pmatrix} 0,5097 \\ 0,1356 \\ 0,2676 \\ 0,0522 \\ 0,0349 \end{pmatrix}$$

- Cálculo do máximo autovalor

O cálculo do máximo autovalor (λ_{max}) é obtido pela média aritmética dos elementos da matriz D, sendo a matriz D resultante da divisão entre os elementos da matriz C pelos elementos da matriz B.

$$\begin{matrix} \text{Matriz A} & & \text{Matriz B} & \text{Matriz C} \\ \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 7 & 9 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 4 & 5 \\ 1/3 & 3 & 1 & 6 & 7 \\ 1/7 & 1/4 & 1/6 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/5 & 1/7 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} & \times & \begin{pmatrix} 0,5097 \\ 0,1356 \\ 0,2676 \\ 0,0522 \\ 0,0349 \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Observe ainda, que a matriz C é o produto da matriz de decisão (matriz A) pela matriz de pesos ou autovetores (matriz B).

$$\text{Matriz C} = \begin{pmatrix} 2,670 \\ 0,710 \\ 1,402 \\ 0,273 \\ 0,183 \end{pmatrix}$$

De posse da matriz C, determina-se a matriz D.

$$\text{Matriz D} = \begin{pmatrix} 2,670 / 0,5097 \\ 0,710 / 0,1356 \\ 1,402 / 0,2676 \\ 0,273 / 0,0522 \\ 0,183 / 0,0349 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5,2384 \\ 5,2363 \\ 5,2384 \\ 5,2359 \\ 5,2430 \end{pmatrix}$$

λ_{max} = média aritmética dos elemento da matriz D

$$\lambda_{max} = 5,2384$$

- Cálculo do Índice de Consistência

O valor de CI é obtido pela equação:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1}$$

sendo que: N é igual a 5, logo:

$$CI = \frac{5,2384 - 5}{5 - 1}$$

Para o exemplo apresentado obtém-se $CI=0,0596$.

- Cálculo do Índice de Aleatoriedade

Para o exemplo apresentado, em que o número de critérios vale 5 tem-se, conforme Tabela 03, $RI=1,12$.

- Cálculo do Razão de Consistência

$$RC = \frac{CI}{RI}$$

Para o exemplo apresentado $CR = 0,0596/1,12 = 0,0532$ ou 5,32%.

- Eventual reavaliação da matriz de comparação se CR superior a 0,1 ou 10%.

Devido à complexidade, no que se refere a sua compreensão, inerente ao método AHP, o questionário foi elaborado no formato de planilha eletrônica (meio digital) no intuito da obtenção de algumas vantagens como facilidade de envio e recepção, eliminação de erros grosseiros, diminuição de falhas interpretativas, automação nas entradas de dados, cálculos automáticos entre outros.

Através da utilização regras de validação e inserção de comentários não é permitido entrar com um valor de julgamento inválido na célula, caso isto ocorra, automaticamente aparecerá uma mensagem explicativa informando os valores tolerados para esta célula e também da impossibilidade de entrada de valores fora dos limites definidos.

De posse de todos os questionários respondidos pelos especialistas, usou-se o método estatístico da moda e média expurgada (FRANCISCO, 2008) para converter as opiniões individuais em um único julgamento representativo do grupo.

Nesta metodologia, o ranqueamento dos critérios foi definido pela moda e seu valor referente ao peso determinado pela média expurgada.

A média expurgada relaciona-se à média dos pesos que satisfazem a seguinte condição:

$$\bar{x} - S \leq \alpha_i \leq \bar{x} + S$$

8

Em que:

\bar{x} = média de todos os pesos finais;

S = desvio-padrão;

α_i = peso sugerido pelos especialistas.

5.2.6 Aplicação da Análise Multicritério

O mapa do potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves foi obtido pela agregação (combinação) dos fatores (critérios) através da aplicação do método de análise multicritério da combinação linear ponderada que nada mais é que uma expressão ou equação matemática (equações 05 e 06) que foi determinada ou solucionada pela técnica de álgebra de mapas. Esta operação é pontual, sendo, portanto, aplicada pixel a pixel. A Figura 39 exemplifica este procedimento usando a seguinte regra de decisão: Riscos à degradação ambiental = $0,4 \cdot \text{Declividade} + 0,1 \cdot \text{Densidade populacional} + 0,2 \cdot \text{Tipo de solo} + 0,1 \cdot \text{Proximidade a estradas} + 0,2 \cdot \text{Cobertura vegetal}$.

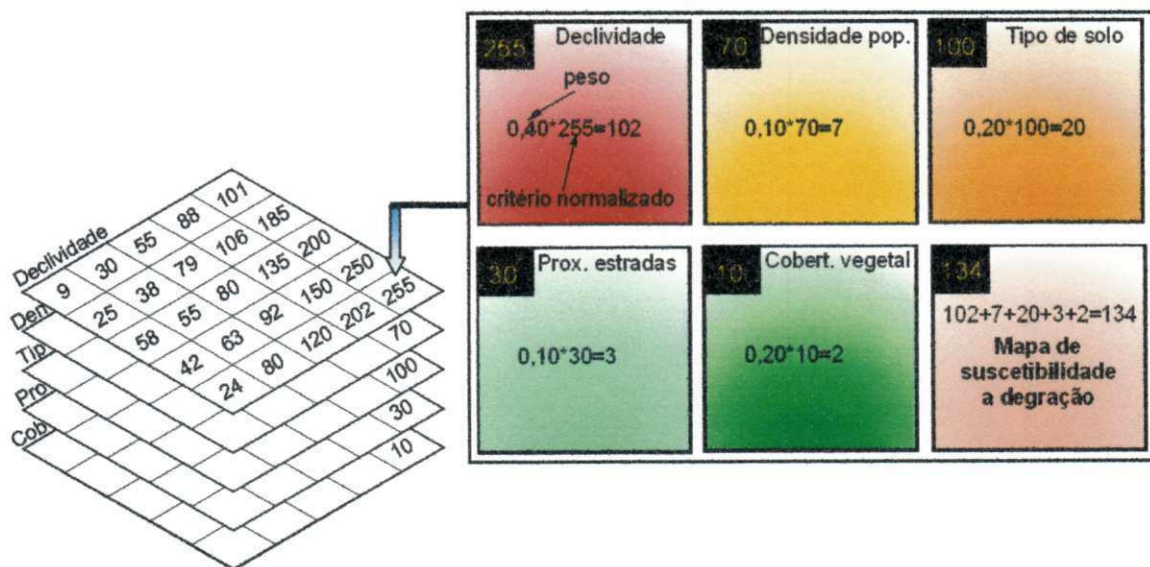


Figura 39. Aplicação do método multicritério combinação linear ponderada célula a célula.

5.2.7 Obtenção do mapa de riscos à degradação ambiental

A aplicação do método multicritério denominado combinação linear ponderada resultou na espacialização de forma contínua dos riscos à degradação ambiental permitindo conhecer sua variação na área da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

O passo seguinte foi a criação e quantificação das classes de riscos à degradação ambiental. Foram adotadas quatro classes de riscos à degradação ambiental, definidas a partir dos limites da escala padrão (Quadro 5).

Quadro 5. Classes de riscos à degradação ambiental.

Limites	Classe de riscos à degradação ambiental
0 a 50	Muito baixo a baixo
51 a 100	Baixo a médio
101 a 150	Médio a alto
151 a 255	Alto a muito alto
Restrições	Áreas não avaliadas

Determinadas as classes de riscos à degradação ambiental, utilizou-se a operação fatiamento para obter o mapa temático, em que foi possível quantificar as áreas de cada categoria ou classe.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados todos os mapas matriciais básicos, os mapas de fatores ou critério normalizados, as tabelas correspondentes a comparação pareada de cada especialista com seus respectivos pesos e, por fim o mapeamento de classes de riscos à degradação ambiental baseado nos critérios: declividade, cobertura vegetal, proximidade a estradas, tipo de solo e densidade populacional.

6.1 Mapas matriciais referentes aos critérios

São apresentados nesse item, os mapas matriciais utilizados na obtenção dos critérios fatores normalizados.

6.1.1 Critérios relativos ou fatores

6.1.1.1 Declividade

Conforme detalhado na metodologia, a modelagem do mapa de declividade foi realizada a partir da elaboração do mapa altimétrico (Figura 40), na qual se constata que as áreas localizadas ao Norte e Noroeste da bacia hidrográfica possuem as maiores altitudes chegando, em alguns pontos, a atingir o valor de mais de 678m.

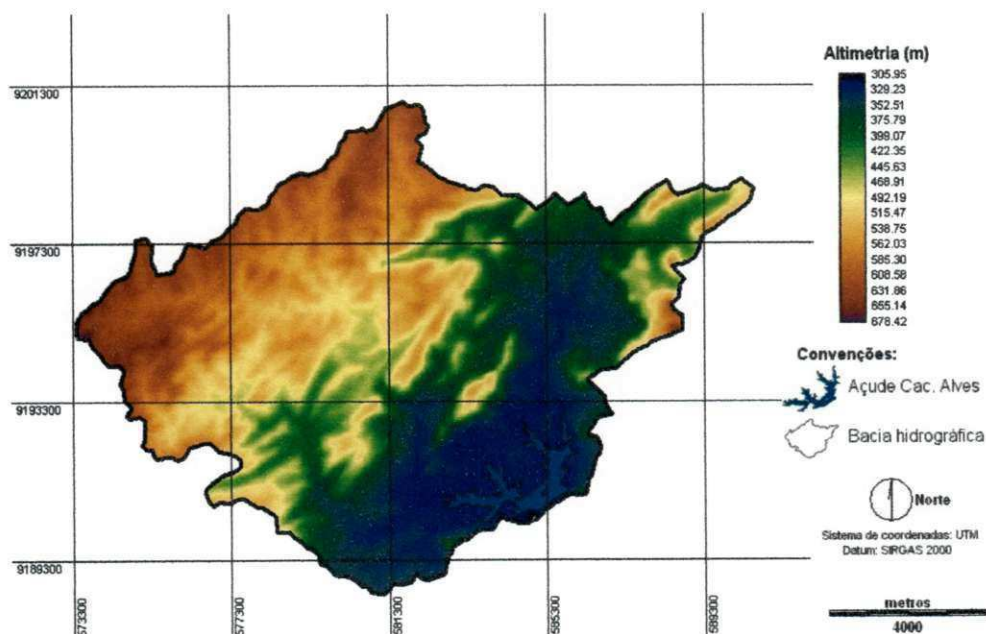


Figura 40. Mapa altimétrico referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

Em contrapartida, as áreas de menores altitudes encontram-se localizadas no entorno do açude Cachoeira dos Alves, ao Sul da bacia hidrográfica. Nessa região, foram obtidos valores de altitudes próximas de 304m, gerando uma diferença ou variação altimétrica de 374m.

A escala de mensuração utilizada na representação do mapa de declividade do terreno teve como unidade de medida valores em porcentagem (Figura 41).

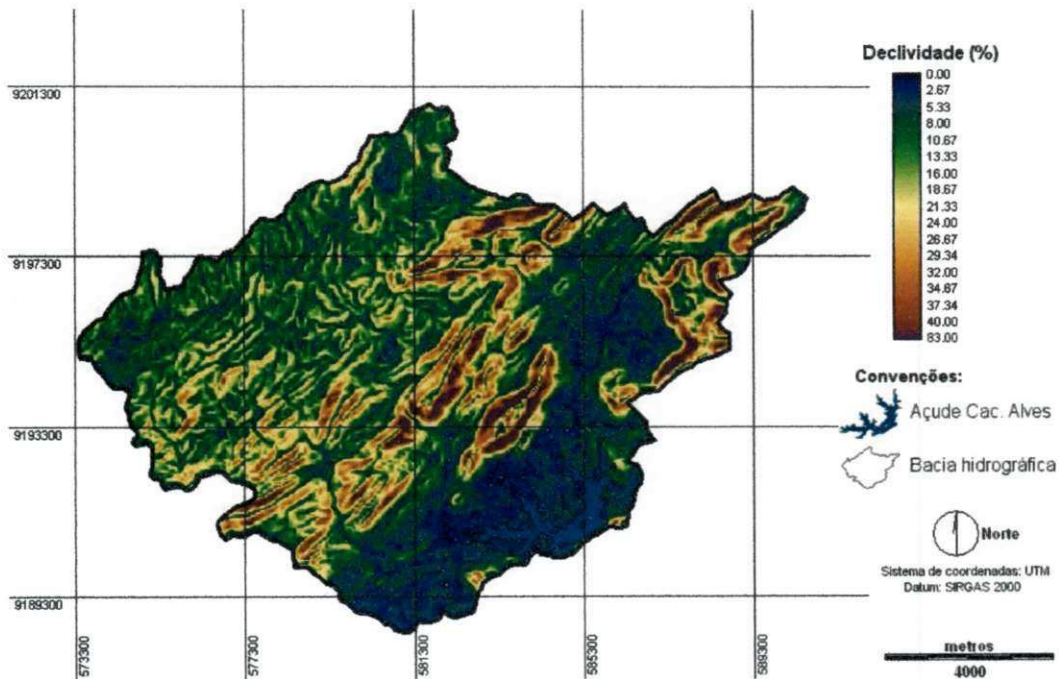


Figura 41. Mapa de declividade referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

No mapa referente à declividade do terreno, observa-se que as maiores declividades estão situadas na parte central e Nordeste da bacia hidrográfica atingindo o valor de 83% em poucos pontos.

Com o objetivo de quantificar as áreas do relevo, foi feito o fatiamento em seis intervalos de classes conforme metodologia da EMBRAPA (2000), Figura 42.

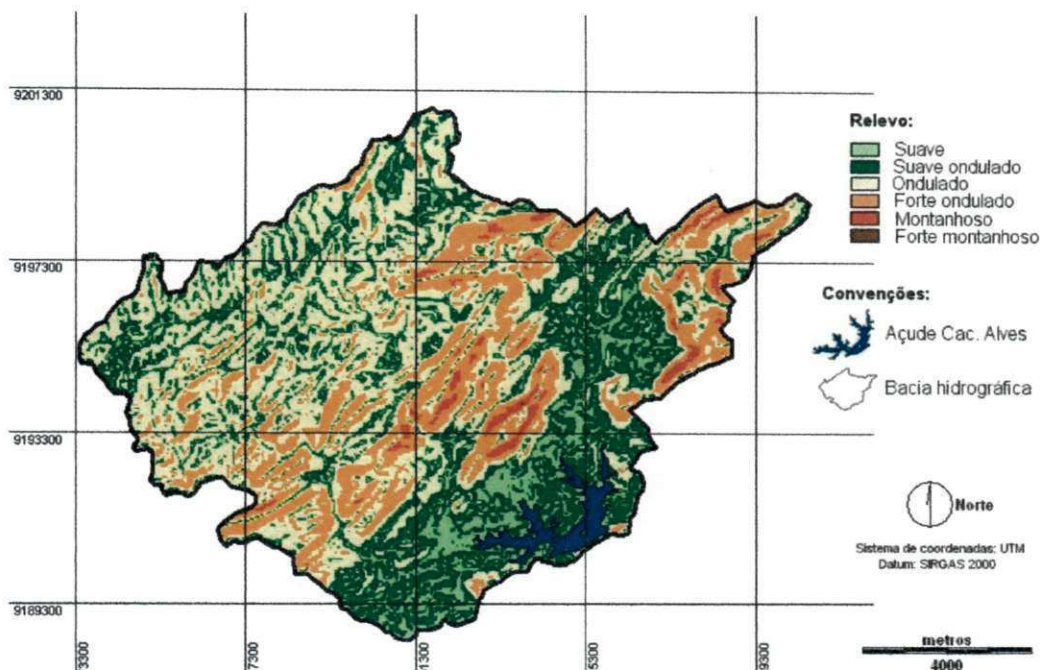


Figura 42. Espacialização das classes de relevo referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

Na Tabela 10 são mostradas as classes de relevo em função de seus limites de declividade com as respectivas áreas, bem como a porcentagem que cada uma ocupa em relação à área total da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

Tabela 10. Classes de declividade de acordo com a classificação da EMBRAPA.

Declividade (%)	Descrição do relevo	Área (ha)	Percentual (%)
0 a 3	Plano	917,25	8,27
3 a 8	Suave ondulado	3.042,42	27,44
8 a 20	Ondulado	4.430,67	39,96
20 a 45	Forte ondulado	2.430,96	21,92
45 a 75	Montanhoso	358,90	2,33
> 75	Forte montanhoso	8,25	0,07
Total		11.088,45	100

A operação de fatiamento em classes permitiu verificar que na região de estudo predomina um relevo suave ondulado a ondulado, ocupando respectivamente 39,96% e 27,44% da área total bacia em estudo.

A Classe de relevo plano corresponde a aproximadamente 8,74% da área, equivalendo a 917,25 ha. As áreas com declividades superiores a 45%, caracterizando

relevo montanhoso e forte montanhoso, foram aquelas que representaram o menor percentual, cuja soma foi inferior a 3% da área total.

Outra categoria de relevo com representatividade verificada na bacia hidrográfica foi a forte ondulado abrangendo uma área de 2.430,96 ha, correspondendo a 21,92% da área total. Esta classe de relevo deve ser destinada à conservação ambiental por favorecer, com frequência, problemas de erosão laminar e por sulco.

6.1.1.2 Solo

O tipo de solo com maior ocorrência na bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves é representado pelos solos Neossolos Litólicos Eutróficos, espacialmente distribuídos na porção central, estendendo-se de Norte a Sul da área de estudo; seguidos dos Argissolos Vermelho Amarelo Eutrófico, localizados na parte Oeste, e em menor proporção os solos Neossolos Flúvicos, situados mais ao Sul, próximo ao açude Cachoeira dos Alves (Figura 43).

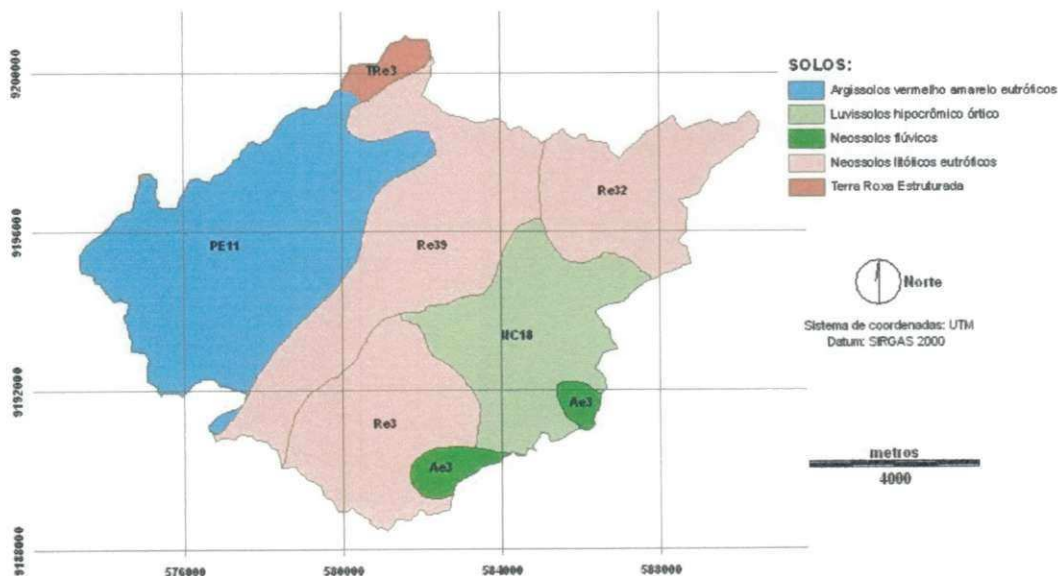


Figura 43. Mapa pedológico referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

A quantificação das áreas correspondentes a cada tipo de solo da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves é exibida na Tabela 11.

Tabela 11. Classificação e quantificação dos solos da bacia.

Tipo de solo	Unidade de mapeamento	Área (ha)	Percentual (%)
Neossolos litólicos eutróficos	Re32	1.382,58	12,47
Argissolos vermelho amarelo eutrófico	PE11	3.377,61	30,46
Nitossolos vermelhos	TRe3	189,36	1,71
Luvissolos hipocrômico órtico	CN18	1.776,42	16,02
Neossolos litólicos eutróficos	Re3	1.522,89	13,73
Neossolos flúvicos	Ae3	281,88	2,54
Neossolos litólicos eutróficos	Re39	2.557,71	23,06
Total		11.088,45	100,00

O segundo tipo de solo com maior abrangência é o Neossolo Litólico Eutrófico ocupando uma área de 3.377,61 ha, correspondendo a 30,46%, enquanto, os solos Luvissolos Hipocrômicos Órtico ocupam 1.776,42 ha, equivalendo a 16,02% da área total.

O tipo de solo com menor representatividade na bacia hidrográfica são os Nitossolos Vermelhos com 1,71% e localizados na parte Norte, de altitudes elevadas.

6.1.1.3 Cobertura vegetal

É mostrada na Figura 44 a carta imagem referente à composição de imagens multiespectrais (R5G4B3), e a partir da qual, foi elaborado o mapa de cobertura vegetal da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

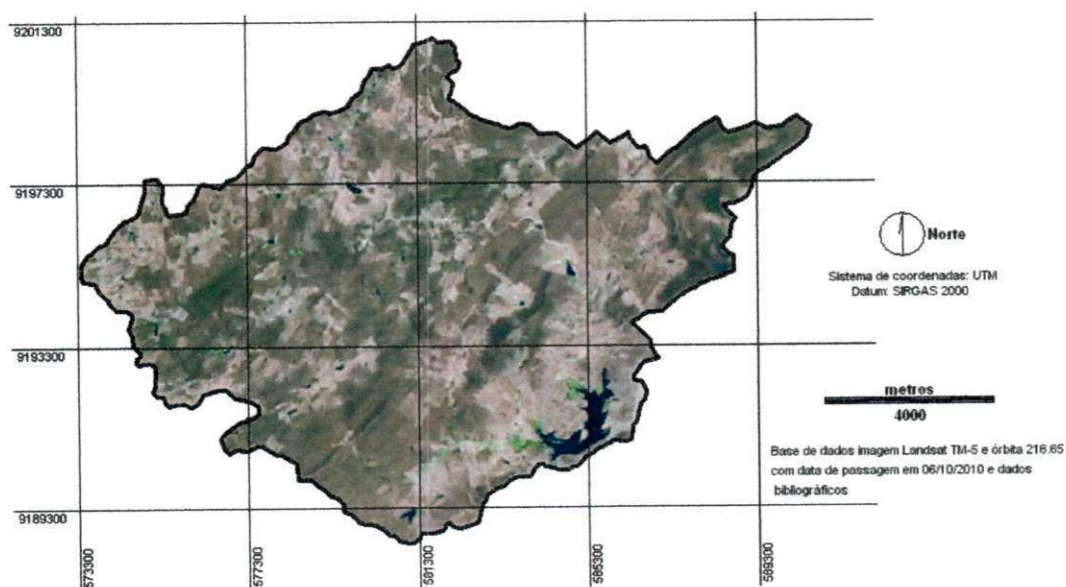


Figura 44. Carta imagem referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

Baseado no mapa de cobertura vegetal, resultante da classificação supervisionada (Figura 45), observa-se que as áreas classificadas como ocupadas por vegetação rala e solo exposto estão, na sua grande maioria, localizadas próximas a algum reservatório de água, principalmente no entorno do açude Cachoeira dos Alves, enquanto aquelas pertencentes à classe vegetação densa ocupam principalmente os topos de serra, caracterizadas como áreas de elevada declividade.

Fazendo uma comparação entre os mapas de cobertura vegetal e declividade do terreno contata-se que as áreas de relevo plano e suave ondulado, caracterizadas por apresentar baixa declividade, coincidem com as classes de solo exposto e vegetação rala no mapa de cobertura vegetal. Este fato direciona-se para a seguinte conclusão: terras de baixas declividades são áreas prioritárias de exploração.

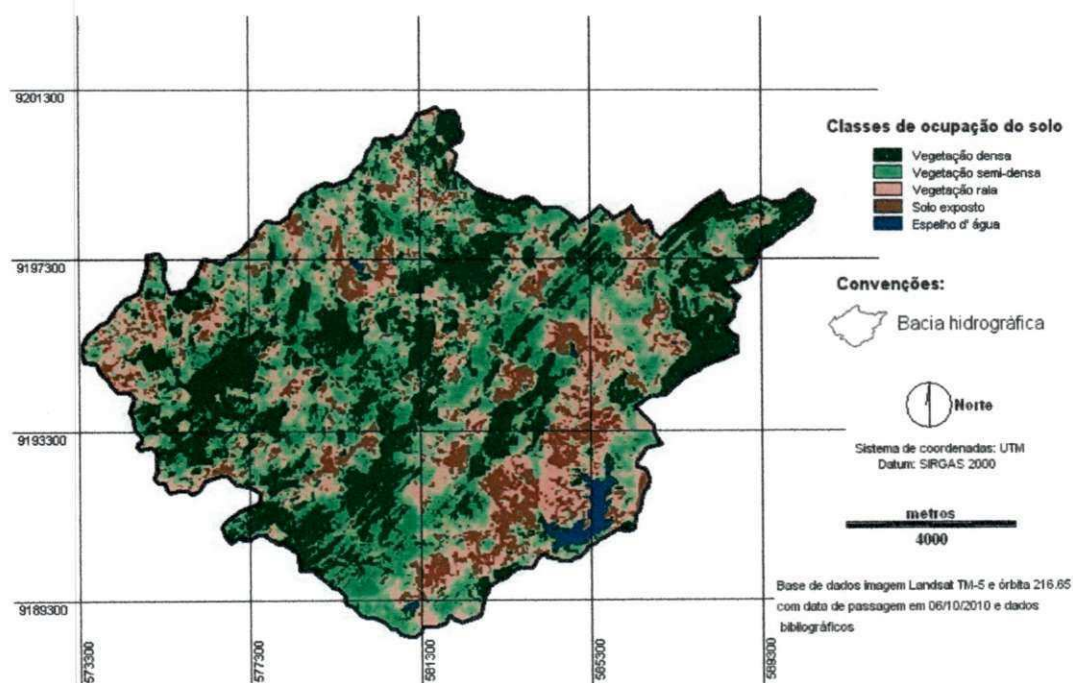


Figura 45. Mapa de classes de cobertura vegetal referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

Na Tabela 12, apresentam-se definidas as classes de cobertura vegetal e suas respectivas áreas, bem como a porcentagem que cada uma ocupa em relação à área total da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

Tabela 12. Classes de cobertura vegetal.

Cobertura vegetal	Área (ha)	Percentual (%)
Vegetação densa	3.435,66	30,98
Vegetação semidensa	3.494,70	31,52
Vegetação rala	2.695,95	24,31
Solo exposto	1.357,47	12,24
Espelho d' água	104,67	0,94
TOTAL	11.088,45	100,00

Considerando os dados da Tabela 12, observa-se que na bacia hidrográfica em estudo, há uma predominância das classes de cobertura vegetal definidas como vegetação densa e vegetação semidensa, somando 62,50% da área total. Isto evidencia que a vegetação nativa possui um bom nível de conservação e/ou recuperação.

Ainda conforme dados apresentados na Tabela 12, verifica-se que 24,31% da área apresenta vegetação rala e 12,24% de área ocupada por solo exposto totalizando 36,55% das terras da bacia hidrográfica com solos pouco ou totalmente desprotegidos e sujeitos a processos erosivos.

A classe espelho d'água abrange 104,67 há, representando, portanto, 0,94% da área total.

Nas Figuras 46 e 47 são exibidas fotografias coletadas durante a fase de trabalho de campo que auxiliaram na classificação da cobertura vegetal da bacia hidrográfica e que correspondente a cada uma das classes adotadas na pesquisa.

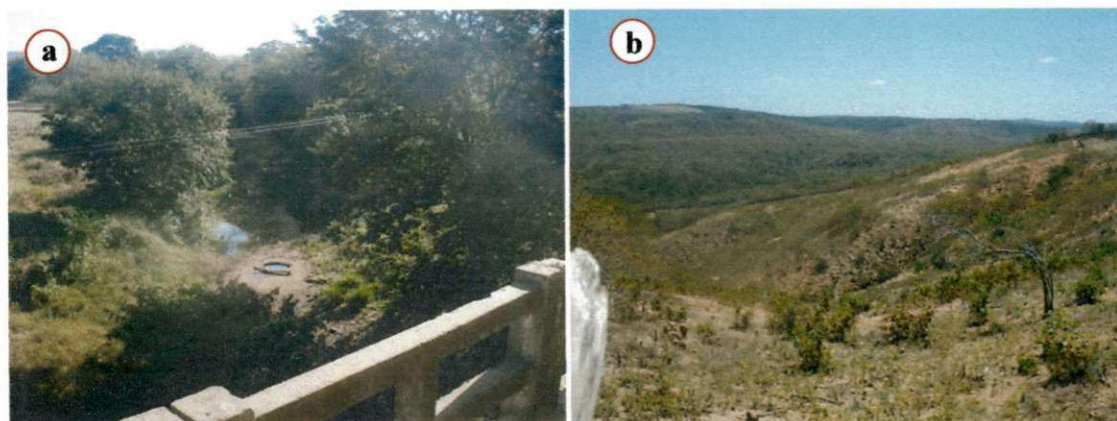


Figura 46. Vegetação densa às margens de rio (a) e semidensa em segundo plano (b).

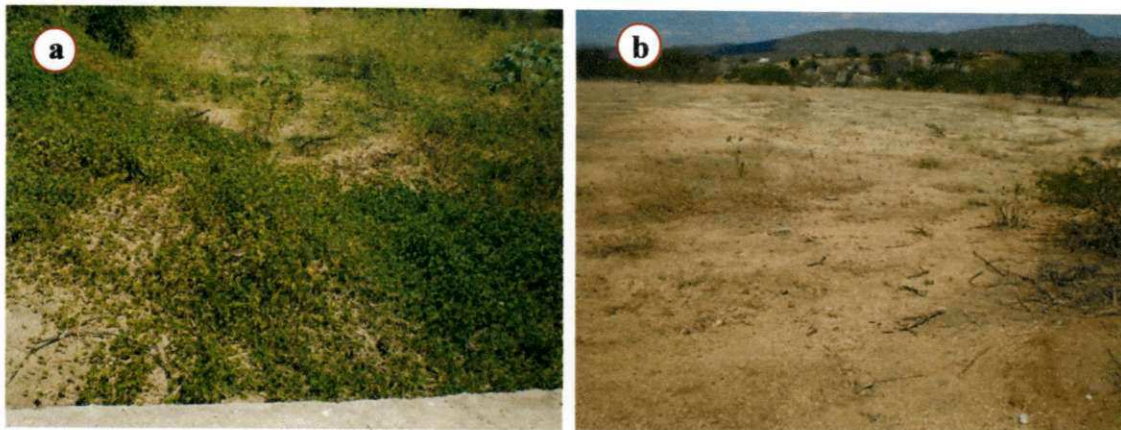


Figura 47. Classes de vegetação rala (a) e Solo exposto (b).

6.1.1.4 Densidade populacional

O levantamento de campo determinou a população residente na bacia hidrográfica, como sendo 1.562 pessoas distribuídas em 469 residências (Figura 48). Como a área da bacia é 110,88 km² resulta uma densidade populacional de 14,09 habitantes/km². O maior e menor valor referente à quantidade de pessoas encontrado em uma única residência foram respectivamente 10 e 1.

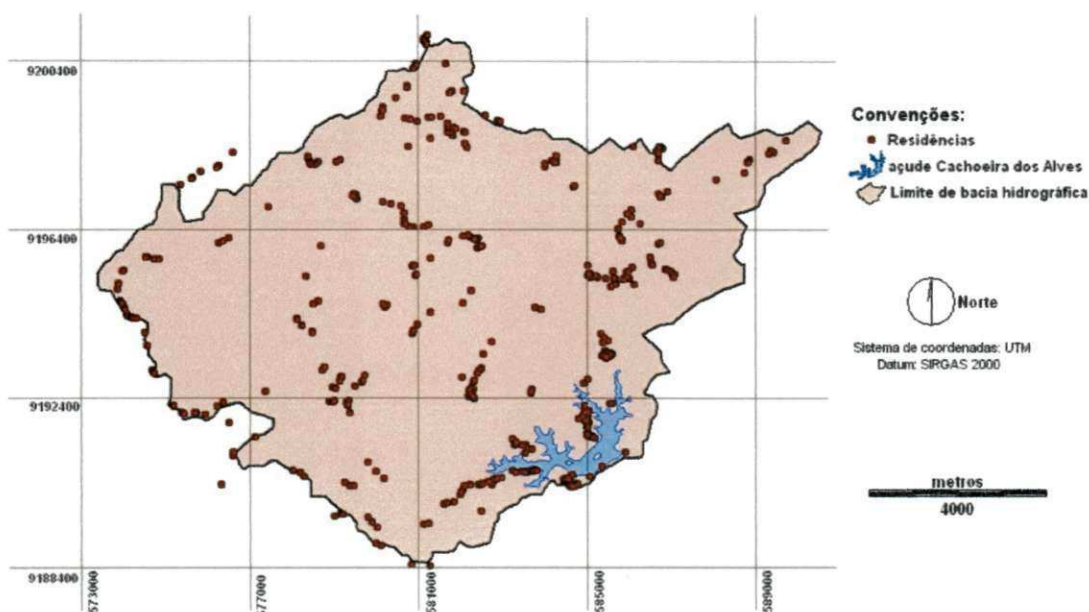


Figura 48. Mapa de localização das residências dentro e no entorno da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

Observa-se que a área da bacia menos habitada situa-se na parte Oeste e aquelas mais povoadas estão distribuídas quase sempre próximas a açudes ou rios.

O mapa de superfície da densidade populacional foi elaborado levando em consideração a população residente próxima à área da bacia hidrográfica (Figura 49), uma vez que suas as ações antrópicas produzem impactos no seu interior.

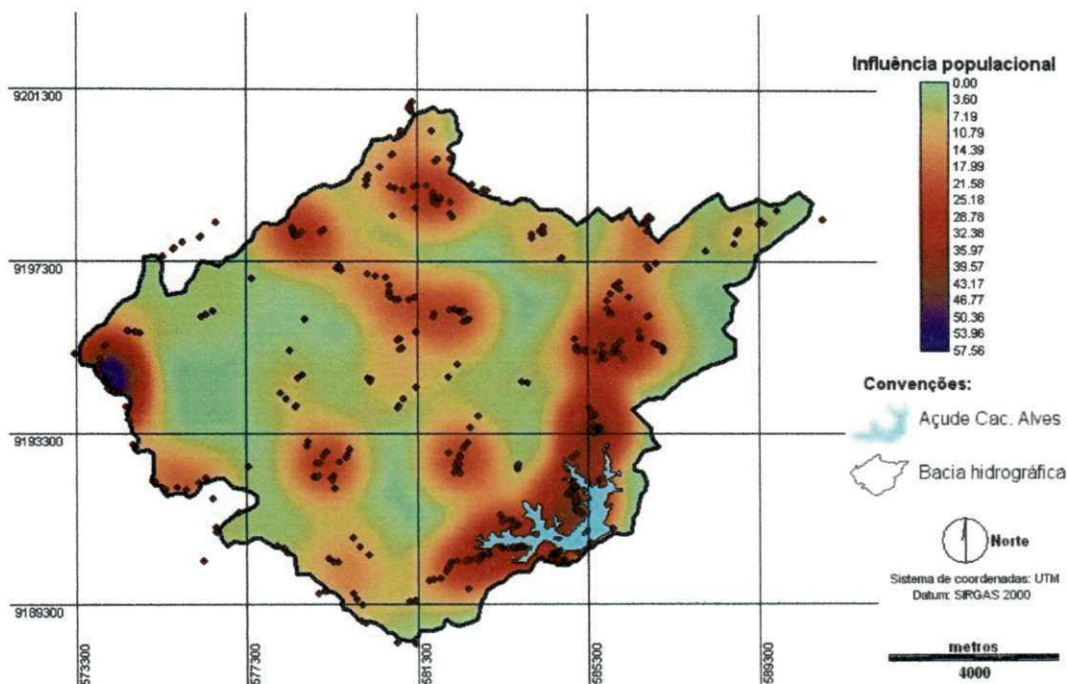


Figura 49. Mapa da densidade populacional da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

6.1.1.5 Proximidade às estradas

As principais vias de acesso à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves são as rodovias estaduais PB-382 e PB-368. A PB-368 margeia os limites da bacia na região sul, enquanto a PB-382, que se encontra em processo de implantação de pavimentação asfáltica (Figura 50), cruza a bacia hidrográfica ligando os municípios de Itaporanga a São José do Caiana.

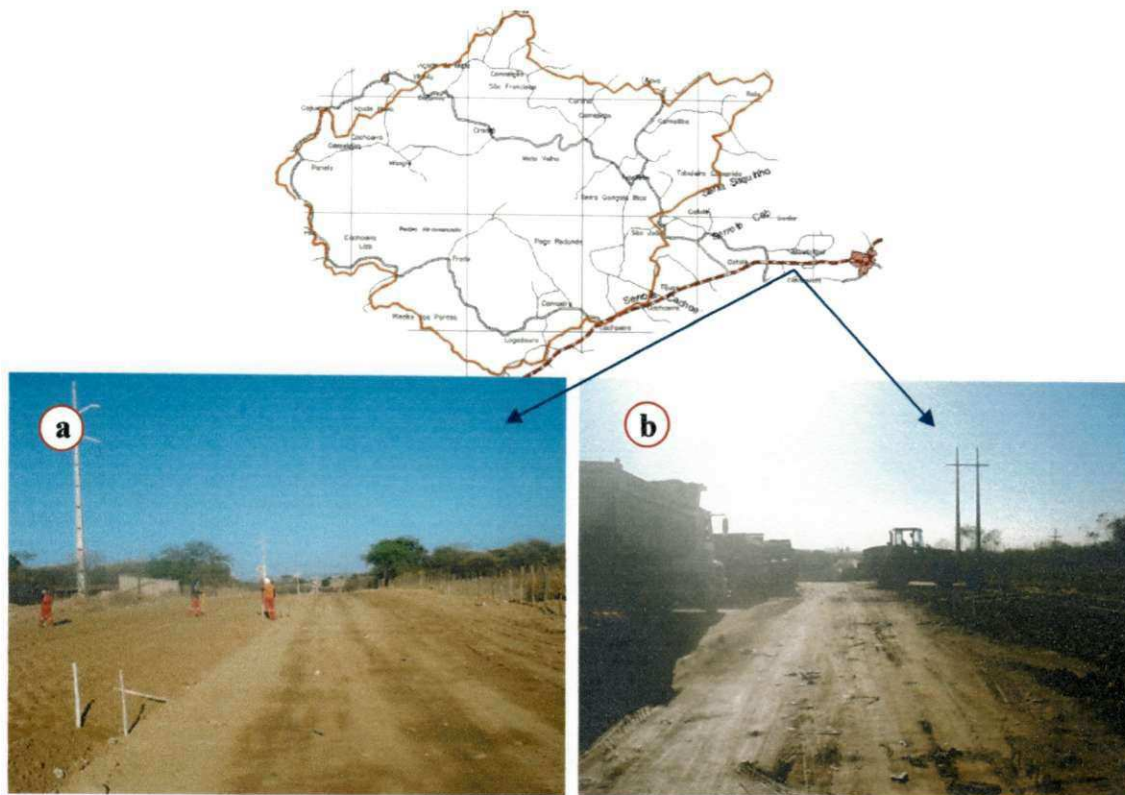


Figura 50. Homens (a) e máquinas (b) trabalhando no asfaltamento do acesso a bacia (PB-382).

Levantou-se uma malha viária de 181,56 km de estradas, sendo 133,32 km inseridos na bacia hidrográfica e qualificados da seguinte forma: 12,48 km de estradas estaduais sendo asfaltadas e 120,84 km de estradas vicinais (pertencentes aos municípios), Figura 51.

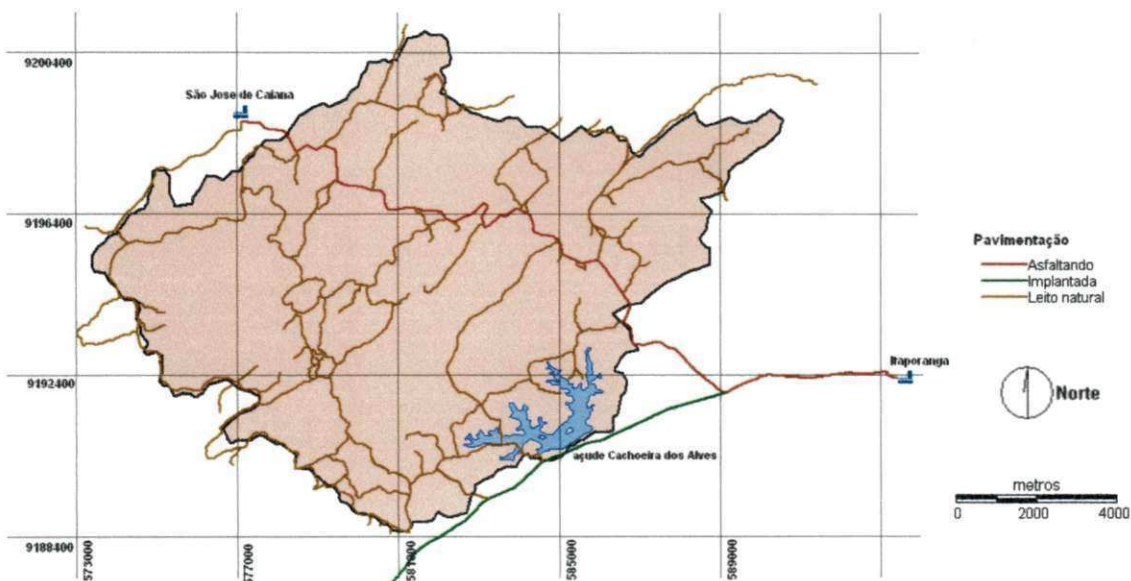


Figura 51. Mapa da rede viária referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga – PB, destacando o tema pavimentação.

No que se refere à malha viária, durante o trabalho de campo, constatou-se a falta de manutenção, precariedade do sistema de drenagem, ausência de limpeza da vegetação marginal e processos erosivos desde em estado inicial a avançados, que muitas vezes interrompe o tráfego de veículos (Figura 52).



Figura 52. Evidências da falta de manutenção na malha viária da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

Na produção do mapa de proximidades a estradas, assim como no de densidade populacional, foi levada em consideração aquelas estradas localizada próximas a área da bacia hidrográfica (Figura 53).

Este critério possui intensa relação com a densidade populacional, pois a distribuição da malha viária, de certo modo, determina a posição das construções residenciais, uma vez que, toda residência esta condicionada a um acesso.

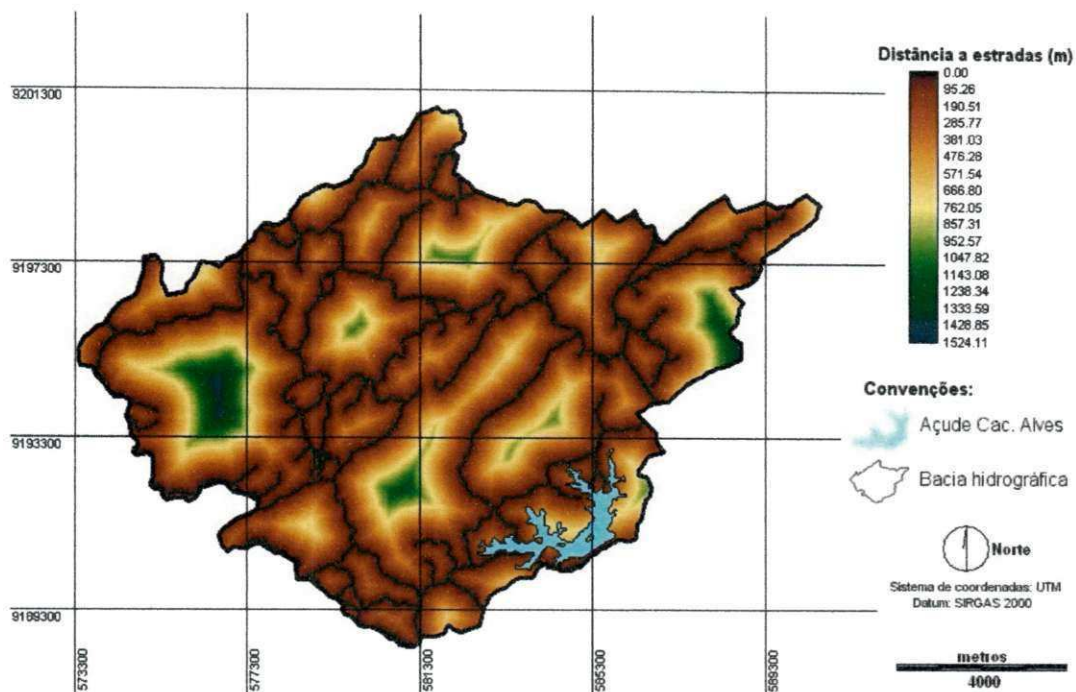


Figura 53. Mapa de distância a estradas referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

Verifica-se no mapa de proximidades a estradas que a região com as maiores distâncias a malha viária encontra-se localizada na porção Oeste da bacia hidrográfica, justamente as áreas de menor densidade populacional. O valor obtido para a maior distância a estradas foi de 1.524,11m.

6.1.2 Critérios restritivos

Os critérios restritivos, como definidos anteriormente, são compostos pelas áreas dos açudes, rios e estradas.

6.1.2.1 Rede de Drenagem e açudes

Composto por um único plano de informação, abrangendo açude e rios, cujas áreas são 247,73 ha (1,57%) e 174,50 ha (2,23%), respectivamente, totalizando um percentual de 3,80% da área total da bacia hidrográfica (Tabela 13).

Tabela 13. Áreas ocupadas referentes aos açudes e rios.

Rede de drenagem	Área (ha)	Percentual
Açudes	247,73	2,23
Rios	174,50	1,57
Total	432,23	3,80

Na Figura 54 é mostrada a distribuição espacial dos 177,40 km de rios que compõem a rede de drenagem da bacia hidrográfica, e também os açudes, principalmente o reservatório Cachoeira dos Alves.

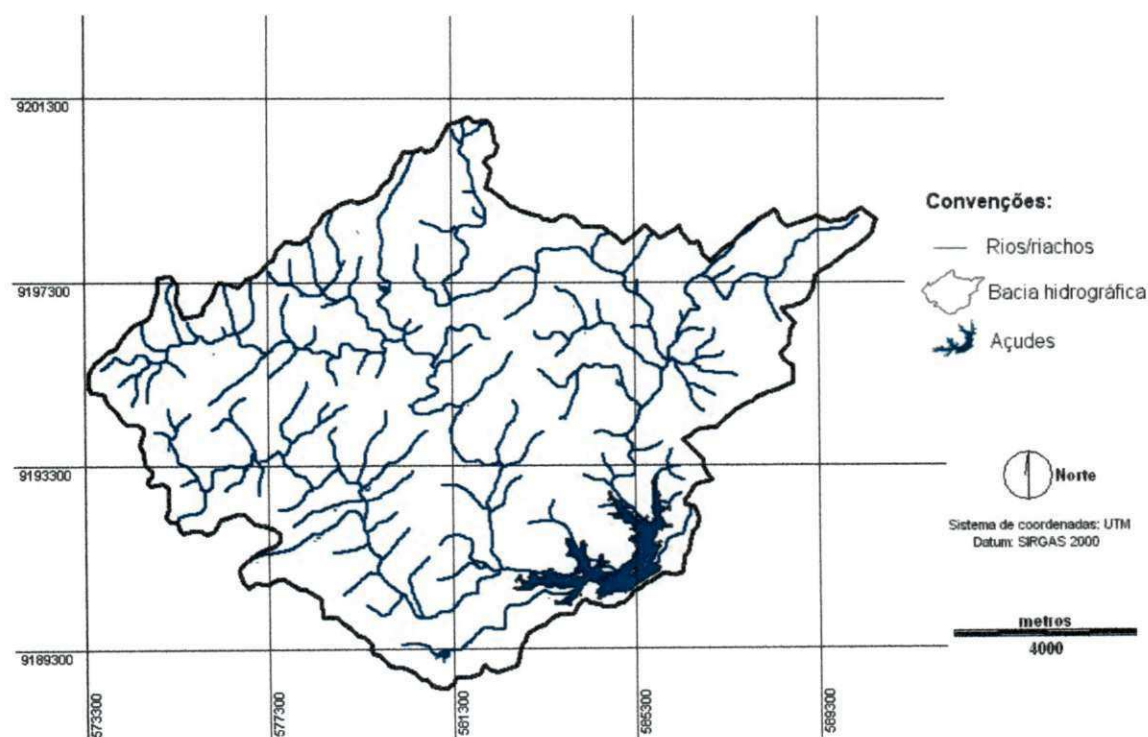


Figura 54. Mapa da rede hidrográfica e açudes referentes à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

6.1.2.2 Malha rodoviária

As áreas ocupadas pela malha viária representam 140,31 ha, o que equivale a 1,27% da área total da bacia hidrográfica (Figura 55).

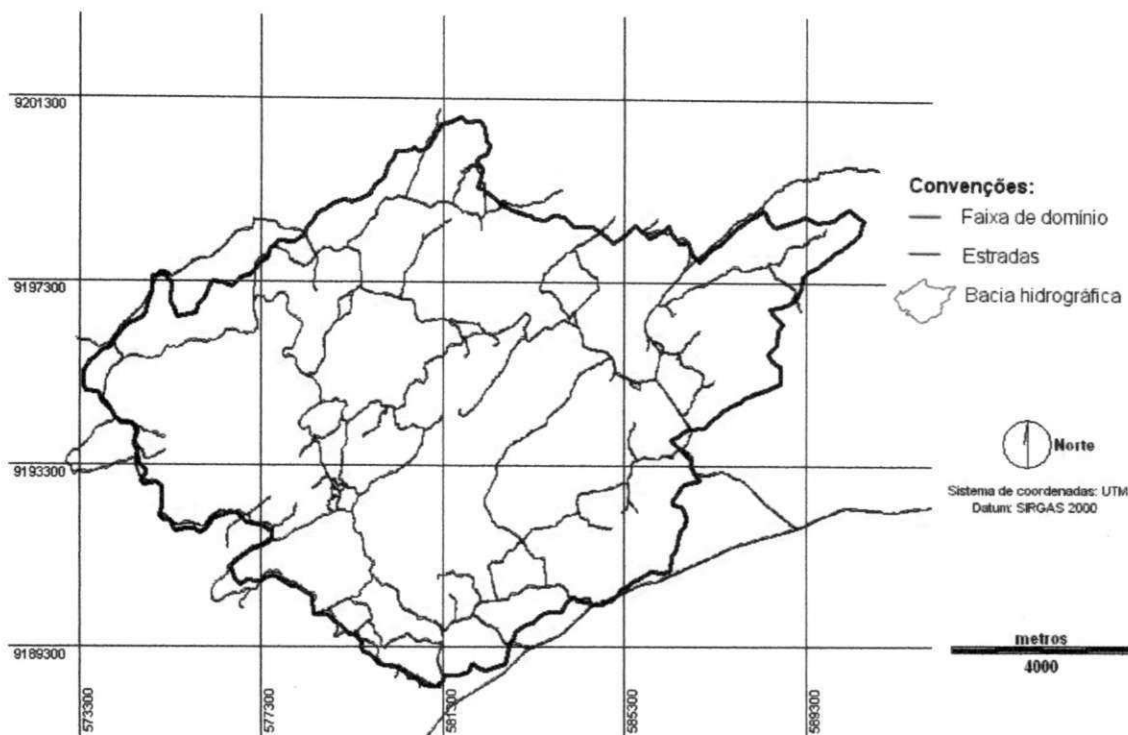


Figura 55. Mapa da rede viária referente à bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

6.2 Mapas matriciais referentes aos critérios normalizados

No processo de normalização utilizaram-se as funções fuzzy linear crescente e sigmodal decrescente para os critérios com escala quantitativa; e uma associação linear de valores para os critérios com escala qualitativa.

6.2.1 Declividade

O mapa relativo ao fator declividade, normalizado pela função fuzzy linear crescente, é exibido em escala contínua de zero (0) a 255 bytes variando do mais baixo para o mais alto potencial de riscos à degradação ambiental Figura 56. Caso fosse levada em consideração apenas a declividade como critério para alcançar o objetivo proposto, ter-se-iam as áreas situadas ao norte do açude Cachoeira dos Alves como aquelas com maior potencial de riscos à degradação ambiental de toda bacia hidrográfica.

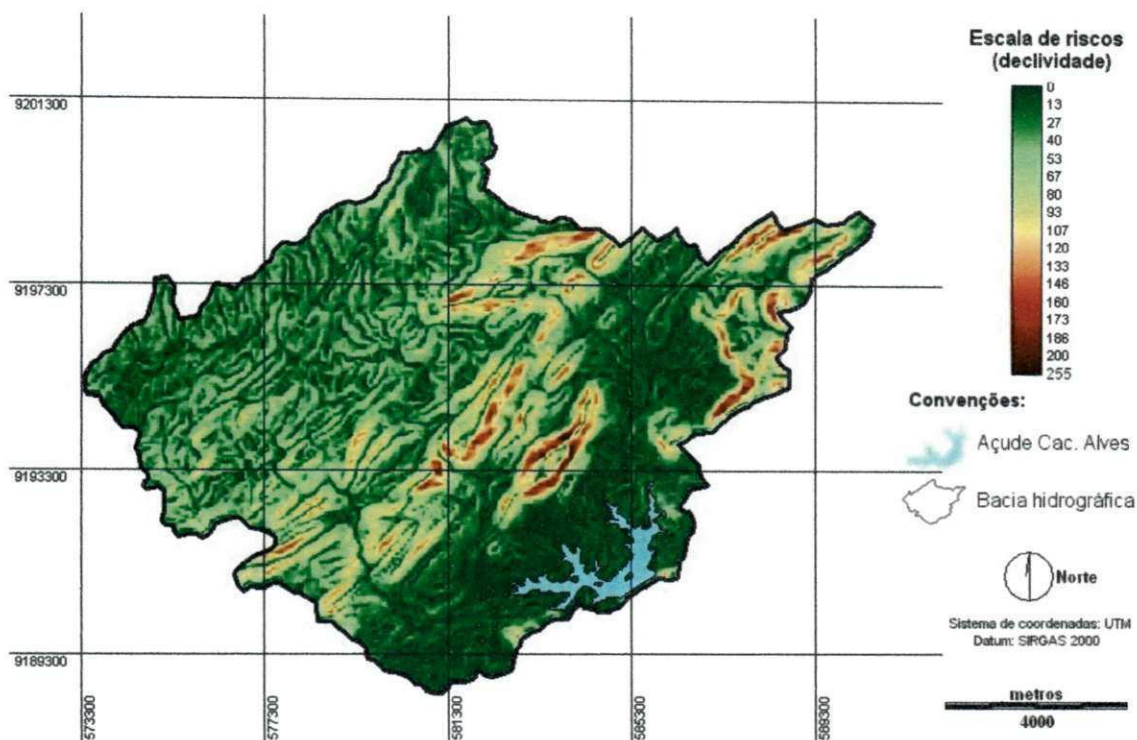


Figura 56. Mapa de fator relativo ao critério declividades da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

Observa-se também, que relativo ao critério declividade, as áreas próximas ao açude Cachoeira dos Alves e às margens dos dois principais afluentes apresentam os menores valores de riscos à degradação ambiental

6.2.2 Proximidade a estradas

O fator proximidade a estradas foi normalizado utilizando a função fuzzy sigmoidal decrescente e mensurado de forma análoga ao fator declividade (Figura 57). Para este fator, a escala de medidas, de zero (0) a 255 bytes, mostra que as áreas com tonalidade verde apresentam menores riscos à degradação ambiental, do ponto de vista deste critério.

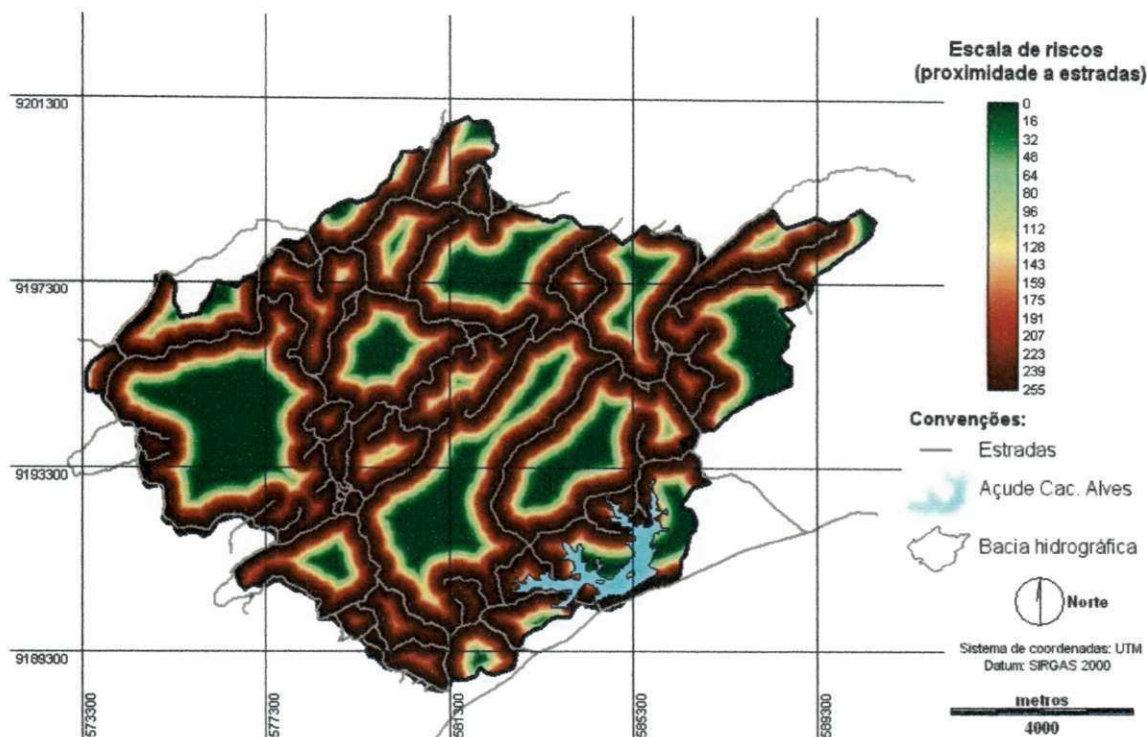


Figura 57. Mapa de fator relativo ao critério proximidade a estradas da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

6.2.3 Cobertura Vegetal

No mapa do fator cobertura vegetal utilizou-se uma operação associativa entre as classes de cobertura vegetal determinadas na bacia hidrográfica e os valores referentes à escala contínua de zero (0) a 255 bytes, tendo como base a ponderação (para cada classe de cobertura vegetal) feita pelos especialistas.

Entende-se que as áreas classificadas como solo exposto são aquelas que apresentam maior potencial de riscos a degradação ambiental recebendo, portanto o maior valor da escala de mensuração (255), enquanto que as terras pertencentes à classe vegetação densa atribuiu-se o valor zero, pois dentre todas, esta apresenta o menor potencial de riscos a degradação do ambiente (Figura 58).

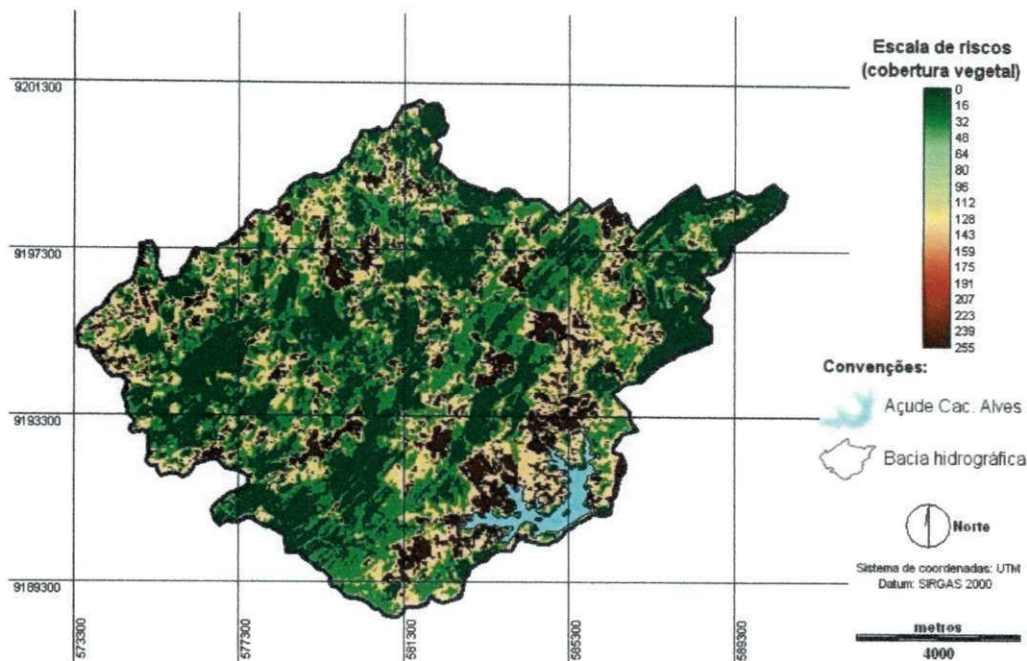


Figura 58. Mapa de fator relativo ao critério cobertura vegetal da bacia hidrográfica.

6.2.4 Tipo de solo

No mapa do fator tipo de solo, igualmente ao fator cobertura vegetal, utilizou-se uma operação associativa entre as classes de tipo de solo e os valores referentes à escala contínua de zero (0) a 255 bytes, tendo como base a ponderação (para cada classe de tipo de solo) feita pelos especialistas, (Figura 59).

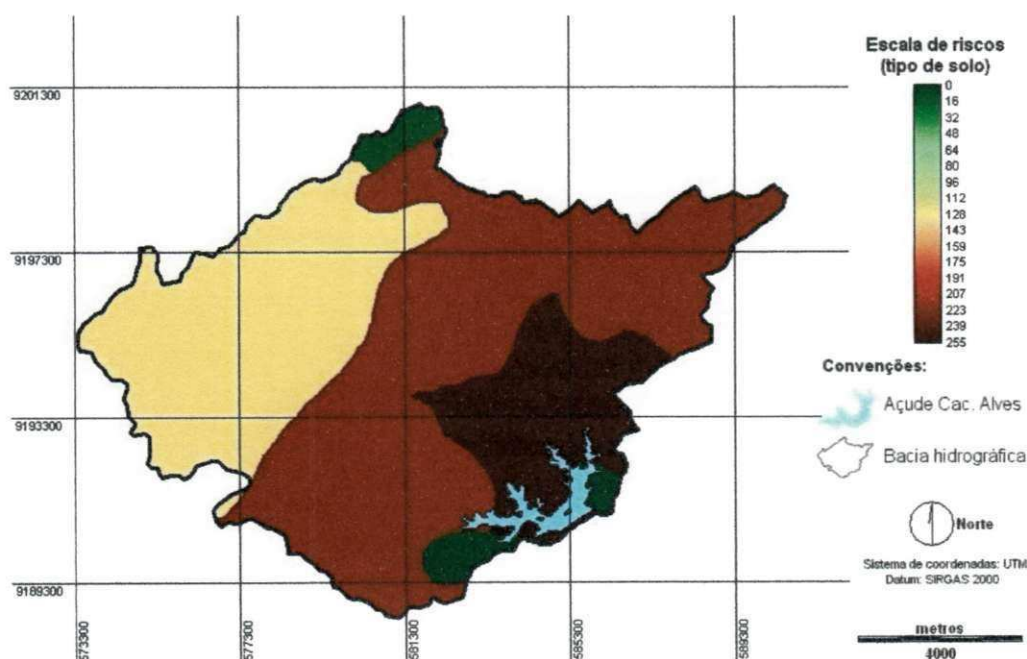


Figura 59. Mapa de fator relativo ao critério tipo de solo da bacia hidrográfica.

6.2.5 Densidade populacional

O fator proximidade a densidade populacional foi normalizado utilizando a função fuzzy linear crescente (Figura 60). Para este fator, a escala de medidas, de zero (0) a 255 bytes, mostra que as áreas próximas ao açude Cachoeira dos Alves apresentam os maiores valores de potencial de riscos à degradação ambiental.

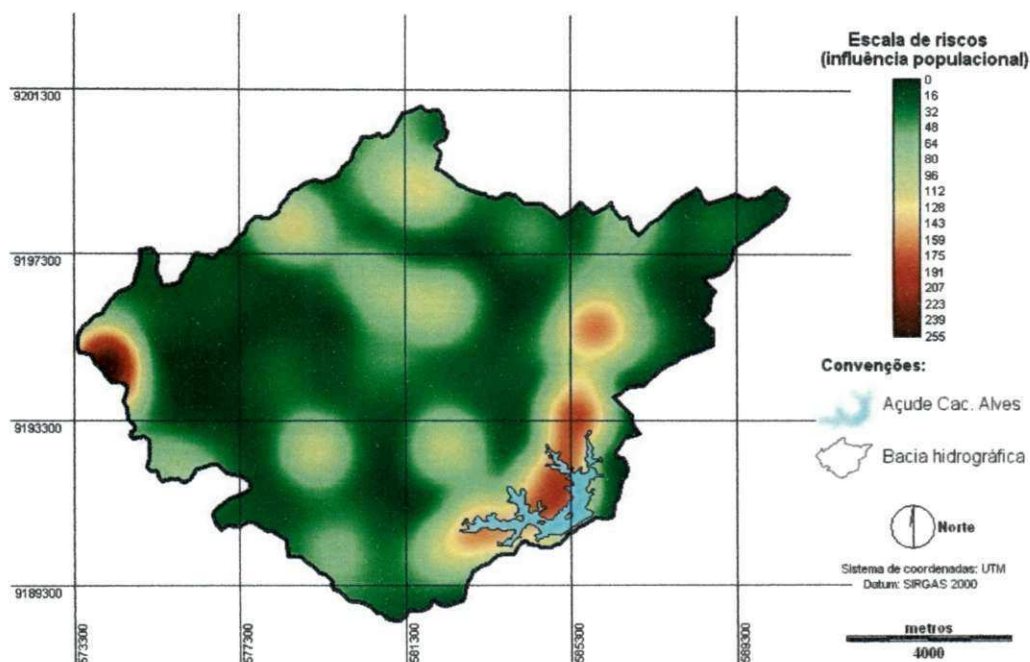


Figura 60. Mapa de fator relativo ao critério densidade populacional da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga - PB.

6.3 Ordenação dos critérios e pesos

Foram enviados dez questionários (planilha eletrônica AHP) aos especialistas, dos quais, oito responderam e enviaram, com uso da internet (e-mail), suas sugestões de pesos baseado na metodologia AHP, o que corresponde a 80%.

A seguir apresentam-se as tabelas (14 a 21) contendo as preferências de cada especialista ambiental,

Especialista 1 – Ordenação dos critérios e pesos: primeiro tem-se o critério cobertura vegetal, seguido pelos critérios declividade, tipo de solo, densidade populacional e proximidades a estradas (Tabela 14).

Tabela 14. Questionário respondido pelo especialista 1.

CRITÉRIO	Cobertura Vegetal	Declividade	Tipo de solo	Densidade populacional	Proximidade a estradas
Cobertura Vegetal	1	3	5	7	9
Declividade	1/3	1	2	4	7
Tipo de solo	1/5	1/2	1	2	4
Densidade populacional	1/7	1/4	1/2	1	2
Proximidade a estradas	1/9	1/7	1/4	1/2	1

Critério	Cobertura vegetal	Declividade	Tipo de solo	Densidade populacional	Proximidade às estradas
Peso (%)	53,01	23,76	12,61	6,75	3,87

Especialista 2 – Ordenação dos critérios e pesos: primeiro tem-se o critério tipo de solo, sendo na sequência os critérios declividade, cobertura vegetal, densidade populacional e proximidades a estradas (Tabela 15).

Tabela 15. Questionário respondido pelo especialista 2.

CRITÉRIO	Tipo de solo	Declividade	Cobertura Vegetal	Densidade populacional	Proximidade a estradas
Tipo de solo	1	3	5	7	9
Declividade	1/3	1	3	5	7
Cobertura Vegetal	1/5	1/3	1	3	5
Densidade populacional	1/7	1/5	1/3	1	3
Proximidade a estradas	1/9	1/7	1/5	1/3	1

Critério	Tipo de solo	Declividade	Cobertura vegetal	Densidade populacional	Proximidade às estradas
Peso (%)	50,28	26,02	13,44	6,78	3,48

Especialista 3 – Ordenação dos critérios e pesos: o julgamento desse especialista hierarquizou os critérios igualmente ao especialista 1, embora ponderando um pouco diferente. Para ele tem-se, primeiro o critério cobertura vegetal seguido pelos critérios declividade, tipo de solo, densidade populacional e proximidades a estradas (Tabela 16).

Tabela 16. Questionário respondido pelo especialista 3.

CRITÉRIO	Cobertura Vegetal	Declividade	Tipo de solo	Densidade populacional	Proximidade a estradas
Cobertura Vegetal	1	2	3	5	9
Declividade	1/2	1	2	4	7
Tipo de solo	1/3	1/2	1	3	6
Densidade populacional	1/5	1/4	1/3	1	5
Proximidade a estradas	1/9	1/7	1/6	1/5	1

Critério	Cobertura vegetal	Declividade	Tipo de solo	Densidade populacional	Proximidade às estradas
Peso (%)	42,84	27,02	17,59	9,26	3,30

Especialista 4 – Ordenação dos critérios e pesos: primeiro tem-se o critério tipo de solo, seguido pelos critérios cobertura vegetal, declividade, densidade populacional e proximidades a estradas (Tabela 17).

Tabela 17. Questionário respondido pelo especialista 4.

CRITÉRIO	Tipo de solo	Cobertura Vegetal	Declividade	Densidade populacional	Proximidade a estradas
Tipo de solo	1	5	7	7	9
Cobertura Vegetal	1/5	1	4	5	5
Declividade	1/7	1/4	1	3	3
Densidade populacional	1/7	1/5	1/3	1	1
Proximidade a estradas	1/9	1/5	1/3	1	1

Critério	Tipo de solo	Cobertura vegetal	Declividade	Densidade populacional	Proximidade às estradas
Peso (%)	56,32	22,97	10,81	5,15	4,75

Especialista 5 – Ordenação dos critérios e pesos: assim como os especialistas 1 e 3 manteve o critério cobertura vegetal como o mais relevante, mas diferentemente de ambos, julgou que o critério tipo de solo é mais importante que o critério declividade.

Na sequência tem-se os critérios, densidade populacional e proximidades a estradas (Tabela 18).

Tabela 18. Questionário respondido pelo especialista 5.

CRITÉRIO	Cobertura Vegetal	Tipo de solo	Declividade	Densidade populacional	Proximidade a estradas
Cobertura Vegetal	1	2	3	8	9
Tipo de solo	1/2	1	3	4	9
Declividade	1/3	1/3	1	6	5
Densidade populacional	1/8	1/4	1/6	1	2
Proximidade a estradas	1/9	1/9	1/5	1/2	1

Critério	Cobertura vegetal	Tipo de solo	Declividade	Densidade populacional	Proximidade às estradas
Peso (%)	43,76	29,42	17,74	5,58	3,50

Especialista 6 – Ordenação dos critérios e pesos: hierarquizou os critérios igualmente ao especialista anterior, embora este tenha aproximado mais os critérios tipo de solo e declividade (Tabela 19).

Tabela 19. Questionário respondido pelo especialista 6.

CRITÉRIO	Cobertura Vegetal	Tipo de solo	Declividade	Densidade populacional	Proximidade a estradas
Cobertura Vegetal	1	2	2	6	9
Tipo de solo	1/2	1	1	4	7
Declividade	1/2	1	1	3	5
Densidade populacional	1/6	1/4	1/3	1	4
Proximidade a estradas	1/9	1/7	1/5	1/4	1

Critério	Cobertura vegetal	Tipo de solo	Declividade	Densidade populacional	Proximidade às estradas
Peso (%)	42,05	24,35	21,41	8,55	3,63

Especialista 7 – Ordenação dos critérios e pesos: para este pesquisador a sequência de importância dos critérios seguiu o julgamento dos especialistas 1 e 3, (Tabela 20).

Tabela 20. Questionário respondido pelo especialista 7.

CRITÉRIO	Cobertura Vegetal	Declividade	Tipo de solo	Densidade populacional	Proximidade a estradas
Cobertura Vegetal	1	3	4	6	9
Declividade	1/3	1	2	5	8
Tipo de solo	1/4	1/2	1	4	7
Densidade populacional	1/6	1/5	1/4	1	4
Proximidade a estradas	1/9	1/8	1/7	1/4	1

Critério	Cobertura vegetal	Declividade	Tipo de solo	Densidade populacional	Proximidade às estradas
Peso (%)	47,59	24,81	17,22	7,29	3,10

Especialista 8 – Ordenação dos critérios: de todas as ponderações, este foi o único que não teve um dos critérios tipo de solo, cobertura vegetal ou declividade como o mais relevante (Tabela 21). Para este especialista, primeiro tem-se o critério densidade populacional, seguido pelos critérios cobertura vegetal, declividade, tipo de solo e proximidade a estradas.

Tabela 21. Questionário respondido pelo especialista 8.

CRITÉRIO	Densidade populacional	Cobertura Vegetal	Declividade	Tipo de solo	Proximidade a estradas
Densidade populacional	1	3	5	7	9
Cobertura Vegetal	1/3	1	3	5	7
Declividade	1/5	1/3	1	3	5
Tipo de solo	1/7	1/5	1/3	1	3
Proximidade a estradas	1/9	1/7	1/5	1/3	1

Critério	Densidade populacional	Declividade	Cobertura vegetal	Tipo de solo	Proximidade às estradas
Peso (%)	47,93	30,26	12,29	6,09	3,44

Na sequência, é exibida a tabela 22 contendo o resultado das preferências individuais de todos os especialistas.

A razão de consistência (RC) dos pesos encontrada para este estudo foi de 0,01, indicando que o julgamento apresentou consistência aceitável, ou seja, menor que 0,1 (10%)

Os valores extremos (mínimo e máximo) obtidos para a razão de consistência (RC) relativa aos julgamentos dos especialistas foram respectivamente 2,00 % e 9,36% (Tabela 22). Sendo assim, de acordo com Saaty (1977), as opiniões foram consistentes e dentro de valores aceitáveis de aleatoriedade (menores que 10%).

Os nomes dos critérios (Tabela 22) foram referenciados para melhor disposição e compreensão da seguinte maneira: Tipo de solo - TS, Declividade - DC, Cobertura vegetal - CV, Densidade populacional - DP, Proximidade a estradas - PE.

Tabela 22. Resultado das Preferências individuais dos especialistas (AHP).

Especialista	ORDEM DE PREFERÊNCIA DOS CRITÉRIOS/PESO (%) ATRIBUÍDO										RC
	1º		2º		3º		4º		5º		
1	CV	53,01	DC	23,76	TS	12,61	DP	6,75	PE	3,87	2,00
2	TS	50,28	DC	26,02	CV	13,44	DP	6,78	PE	3,48	5,42
3	CV	42,84	DC	27,02	TS	17,59	DP	9,26	PE	3,30	4,48
4	TS	56,32	CV	22,97	DC	10,81	DP	5,15	PE	4,75	6,86
5	CV	43,76	TS	29,42	DC	17,74	DP	5,58	PE	3,50	5,13
6	CV	42,05	TS	24,35	DC	21,41	DP	8,55	PE	3,63	2,71
7	CV	47,59	DC	24,81	TS	17,22	DP	7,29	PE	3,10	6,81
8	DP	47,93	CV	30,26	DC	12,29	TS	6,09	PE	3,44	9,36
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A opinião do grupo de especialistas foi obtida utilizando o método da moda e média expurgada, em que se definiu a importância dos critérios e seus respectivos pesos baseado no processamento dos dados contidos na tabela 22. Através da moda ou frequência, verificou-se que o critério mais importante foi a cobertura vegetal, sendo esta afirmação, ratificada por cinco dos oito especialistas consultados, seguidos da

declividade do terreno, tipo de solo, densidade populacional e proximidades a estradas (Tabela 22).

Na Figura 61 é apresentado o gráfico, em que é possível visualizar os percentuais atribuídos apenas aos critérios definidos para cada posição com seus valores expurgados, ou seja, para o fator cobertura vegetal (mais importante ou primeira posição no rank) têm-se cinco pesos, dos quais um foi expurgado.

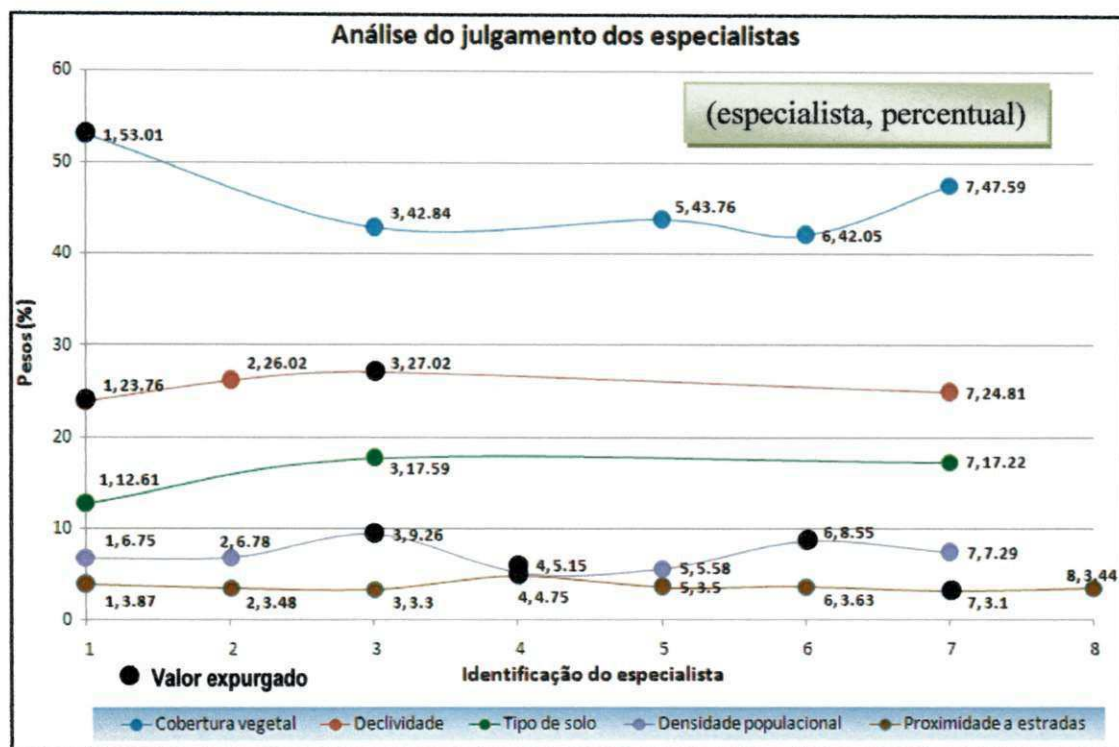


Figura 61. Composição dos pesos referentes apenas aos critérios definidos para cada uma das cinco posições no rank.

Após a eliminação dos valores discrepantes referentes aos pesos, foi obtida a média expurgada para cada critério e em seguida realizou-se a operação de normalização de modo que a soma dos valores da ponderação resultou 100% (Tabela 23).

Tabela 23. Resultado das Preferências do grupo de especialistas.

RANK da Frequência	ORDEM DE PREFERÊNCIA DOS CRITÉRIOS E PESOS										
		1°	2°		3°		4°		5°		Soma
Média expurgada	CV	44,06	DC	25,42	TS	15,81	DP	6,60	PE	3,54	95,42
Média Normalizada		46,18		26,64		16,57		6,92		3,71	100,00

São exibidos de forma gráfica, os pesos e o ranqueamento dos critérios considerados neste trabalho que, de acordo com o que foi definido, traduziu o julgamento do grupo de especialistas (Figura 62).

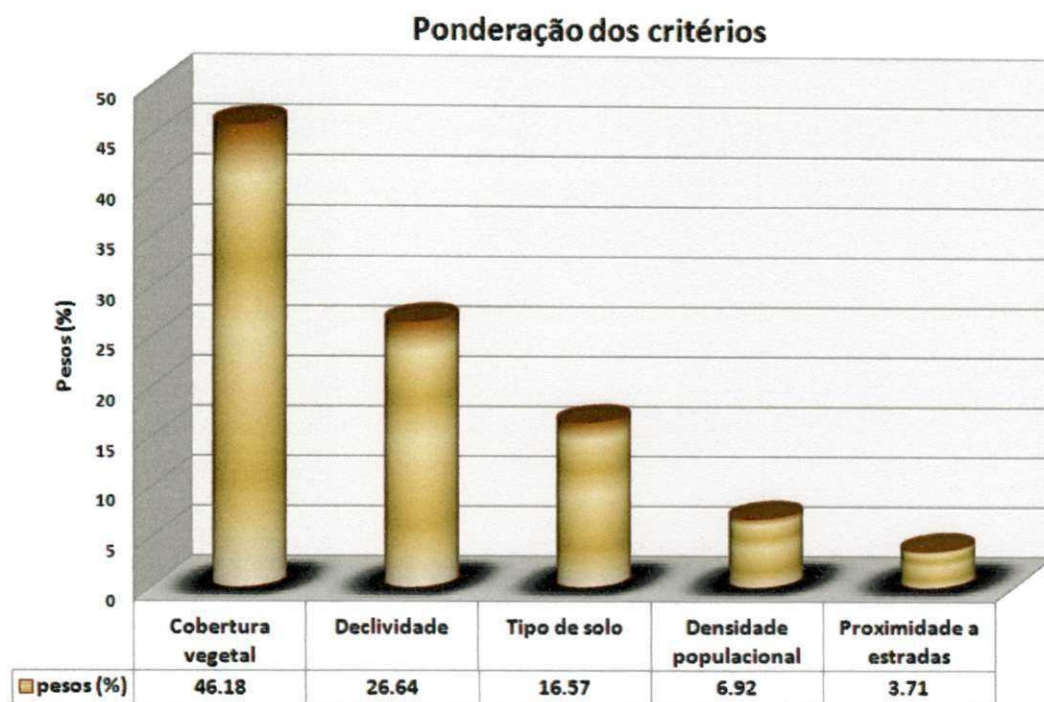


Figura 62. Composição dos critérios e seus respectivos pesos.

O critério cobertura vegetal, na opinião do grupo de especialista, equivale, a quase 50%, em termos de importância relativa à degradação ambiental. Isto implica, em que, naquelas áreas da bacia hidrográfica com cobertura vegetal desfavorável (solo exposto), provavelmente serão classificadas de alto risco a degradação ambiental, a menos que sejam muito compensadas positivamente pelos outros critérios.

Já o critério Proximidade às estradas apresentou 3,71% de relevância, ocupando a última posição no *rank*. Sendo assim, as áreas que, do ponto de vista deste critério, elevariam o nível de riscos a degradação ambiental (pouco distantes de estradas), terão um reflexo, no mapa final dos riscos, quase nulo em função do seu baixo peso.

6.4 Mapa de potencial de riscos à degradação ambiental

Determinados os pesos e elaborados os mapas referentes aos critérios normalizados chegou-se a árvore de decisão que resultou na obtenção do mapa dos

riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves (Figura 63).

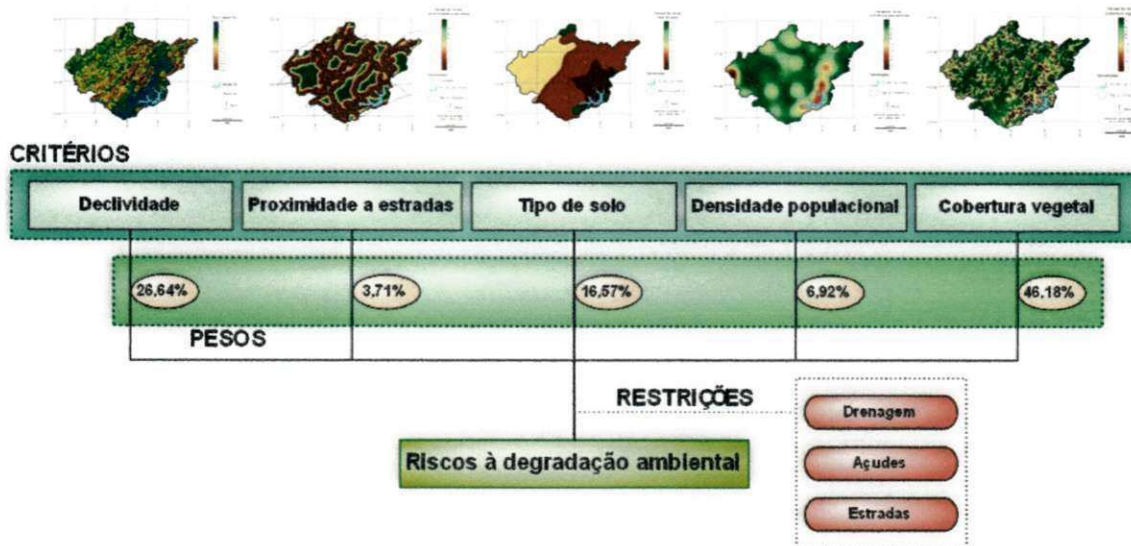


Figura 63. Modelagem da árvore de decisão para o potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

Com a utilização do método da combinação linear ponderada para agregação dos critérios, obteve-se o mapa que representa uma superfície contínua que mostra o potencial dos riscos à degradação ambiental em toda área da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, com medidas associadas á escala padrão (0 a 255). Nesta escala de mensuração, valores menores indicam baixo risco à degradação ambiental, e ao contrário, valores elevados caracterizam áreas com alto potencial de riscos, conforme se observa na Figura 64.

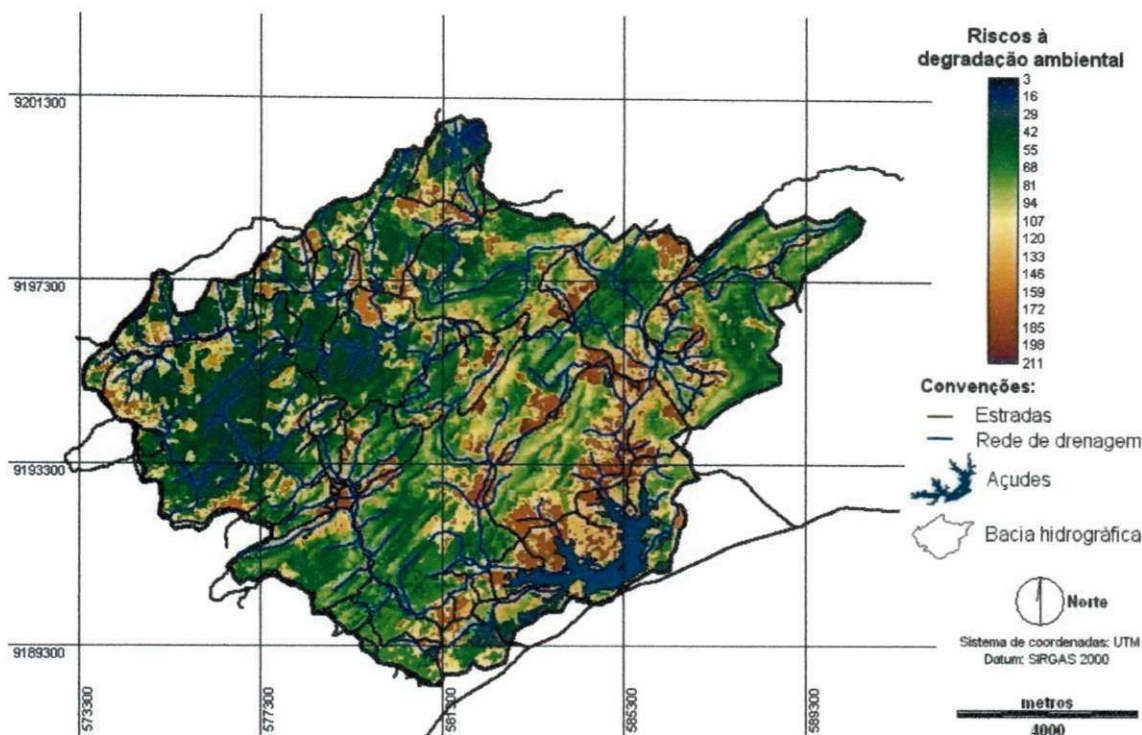


Figura 64. Mapa da distribuição espacial do potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB.

Os valores obtidos na avaliação dos riscos à degradação ambiental variaram de 3 a 211 mostrando que não há áreas avaliadas com risco máximo 255 e mínimo zero.

As áreas adjacentes ao açude Cachoeira dos Alves e as situadas às margens do Rio Cachoeira são aquelas em que se verificou os valores mais elevados dos riscos à degradação ambiental (Figura 65). Em contrapartida, estas áreas, apresentam as menores declividades da bacia hidrográfica (Figuras 41), que dentro do que foi proposto, proporciona baixos riscos à degradação ambiental. Neste caso, o elevado risco à degradação ambiental atribuído a estas áreas é justificado pela compensação dos outros critérios como solo exposto, elevada densidade populacional, luvisolos e baixa proximidade às estradas; características que proporcionam altos riscos (Figuras 45, 49, 43 e 50).

Os valores mais elevados de declividade localizam-se ao Norte, logo acima do açude Cachoeira dos Alves (Figura 65), característica que foi compensada pelos outros critérios resultando em áreas de baixos riscos à degradação ambiental (Figura 64).

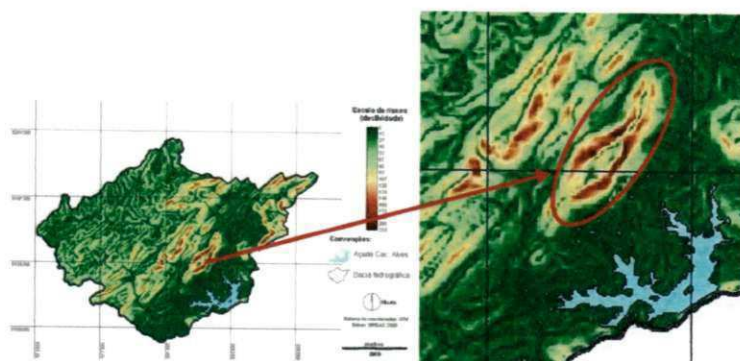


Figura 65. Detalhe da posição geográfica onde se localiza as maiores declividades da bacia hidrográfica.

É exibido na Figura 66 o mapa final classificado em quatro classes de potencial de riscos à degradação ambiental: muito baixo a baixo, baixo a médio, médio a alto e alto a muito alto, depois da execução da operação de fatiamento em classes.

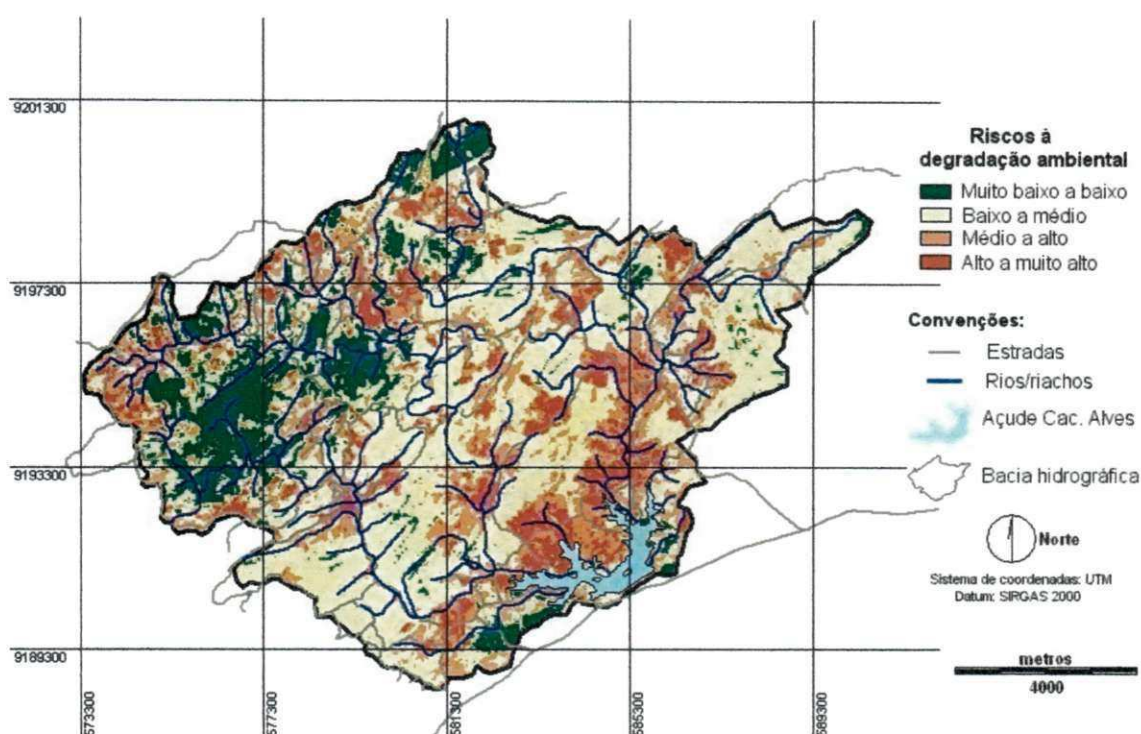


Figura 66. Mapa de classes referente ao potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB.

O mapa temático de riscos à degradação ambiental permitiu a quantificação das áreas referentes a cada um das quatro classes, conforme resultados apresentados na Tabela 24.

Tabela 24. Determinação das áreas relativas às classes de potencial de riscos à degradação ambiental da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB.

Classes de riscos a degradação ambiental	Limites	Área (ha)	Percentual
Muito baixo a baixo	0 a 50	1.453,56	13,11
Baixo a médio	51 a 100	5.479,17	49,41
Médio a alto	101 a 150	2.389,48	21,55
Alto a muito alto	151 a 255	1.203,70	10,86
Áreas não avaliadas	-	562,54	5,07
Soma		11088,45	100

Analisando conjuntamente os dados da Tabela 24 e a Figura 84, observa-se que a classe com maior potencial de riscos à degradação ambiental classificada como “Alto a muito alto” ocupa uma área de 1.203,70 ha correspondente a 10,86% das terras da bacia hidrográfica, e concentradas de forma mais intensa nas áreas próximas a algum reservatório hídrico (rios ou açudes).

Na área da bacia hidrográfica, a classe de riscos à degradação ambiental que teve maior predominância foi a classificada como “Baixo a médio” ocupando um total de 5.479,17 ha, equivalente a um percentual de 49,41%, distribuída em toda bacia, com menores ocorrências verificadas na porção Oeste, terras com altitudes elevadas.

A classe denominada como “Médio a alto” corresponde a 21,55% da área total da bacia hidrográfica abrangendo uma área de 2.389,48 ha.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, no contexto da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves, foi permitido o desenvolvimento das seguintes conclusões:

O critério mais importante na avaliação dos riscos à degradação ambiental, segundo os especialistas, foi a cobertura vegetal correspondendo a 46,18%. Enquanto, proximidade a estradas foi avaliado como o critério de menor relevância com 3,71%. Os critérios declividade, tipo de solo e densidade populacional obtiveram importância de 26,64%, 16,57% e 6,92%, respectivamente.

Com relação aos riscos à degradação, a classe com maior ocorrência foi “Baixo a médio” e a menor “Alto a muito alto” abrangendo respectivamente 5.479,17 ha (49,41%) e 1.203,70 ha (10,86%) da área total da bacia hidrográfica do açude Cachoeira dos Alves.

As classes “Muito baixo a baixo” e “Médio a alto” ocupam 1.453,56 ha e 2.389,48 ha, correspondendo a 13,11% e 21,55% respectivamente da área total da bacia hidrográfica com 562,54 ha (5,07%) de áreas não avaliadas.

O método multicritério combinação linear ponderada, em ambiente SIG, é adequado na determinação e espacialização do potencial de riscos à degradação ambiental em bacias hidrográficas, visando à tomada de decisão para conservação de seus recursos naturais.

O uso dos critérios cobertura vegetal, declividade do terreno, tipo de solo, densidade populacional e proximidades a estradas mostraram eficientes no mapeamento das classes do potencial de riscos à degradação ambiental.

O critério densidade populacional foi o mais complexo de se trabalhar tanto devido à difícil interpretação da sua espacialização em mapas contínuos e por apresentar um dinamismo espaço-temporal muito elevado.

A aplicação do método de consulta Delphi baseada nos princípios da comparação pareada (AHP) mostrou-se uma combinação excelente na determinação de pesos para as variáveis em estudo.

9 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.T. e COSTA, A.P.C. S. **Aplicações com métodos multicritério de apoio à decisão**. Série: Pesquisa Operacional, v.25, n2, Rio de Janeiro, 2005.
- ANTONELLO, S. L. **U Sistema de planejamento e gestão para bacias hidrográficas com o uso de análise multicritério**. 2008. 18p. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada). Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Piracicaba, 2008.
- BARTOLOMEU, T. A.; FERREIRA, M. E. M. (2000) Tomada de decisão através de múltiplo atributo difuso: Uma revisão e uma Nova Técnica de Elucidação das preferências. In: [http://www.eps.ufsc.br/~martins/fuzzy/fuz ap/fudm2/fudm2.htm](http://www.eps.ufsc.br/~martins/fuzzy/fuz%20ap/fudm2/fudm2.htm) .
- BINDER, Fábio Vinícius. **Sistemas de apoio à decisão**. São Paulo: Érica, 1994.
- BRASIL. SUDENE. 1972. Ministério do Exército – Departamento de Engenharia e Comunicações - Diretoria de Serviços Geográficos. Região Nordeste do Brasil.
- BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Especial: desertificação e semi-árido**. Boletim 10. Brasília, 2005.
- CALIJURI, M.L.; MELO, A.L.O.; LORENTZ, J.F. **Identificação de áreas para implantação de Aterros Sanitários com o uso de análise estratégica de decisão**. Informática Pública, v.4, n.2, p. 231-250. 2002.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; D’ALGE, J. C. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. 2 ed. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; MEDEIROS, J. S. Geoprocessamento para projetos ambientais. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos, SP, INPE, 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd>> Acesso em 21 de março de 2011.
- CHEN, K., BLONG, R., JACOBSON, C. **MCE-RISK: integrating multicriteria evaluatio and GIS for risk decision-making in natural hazards**. Environmental Modelling Software. v.16, n.4, p. 387-397, Jun. 2001
- CORSEUIL, C. W. **Técnicas de geoprocessamento e de análise multicritérios na adequação do uso das terras**. 2006. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, 2006.
- COSTA, M. S. da. **Mobilidade urbana sustentável: um estudo comparativo e as bases de um sistema de gestão para Brasil e Portugal**. 2003. 52p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DUARTE, S. M. A. **O desastre da desertificação no município de Taperoá, Estado da Paraíba Brasil**. 2008. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

EASTMAN, J.R.; JIN, W.G.; KYEM, P.A.K.; TOLEDANO, J. **Raster procedures for multicriteria/multi-objective decisions**. Photogrammetric Engineering and RemoteSensing, Bethesda, v. 61, n. 5, p. 539-547, 1995.

EASTMAN, J.R.; JIANG, H. **Fuzzy Measures in Multicriteria Evaluation**. Proceedings, Second International Symposium on Spatial accuracy Assessment in Natural resources Environmental Studies, Fort Collins, Colorado, 1996.

EASTMAN, J. R. **Idrisi For Windows versão 2. Manual do usuário: Introdução e exercícios tutoriais**. Porto Alegre: UFRGS - Centro de Recursos Idrisi, 1998.

EASTMAN, J. R. **Idrisi Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: Clark University, 328p. Manual Version 14.00, 2003.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. xxvi, 412p. il. CDD 631.44

ESTES, Gerald M e KUESPERT, Don. **Delphi in industrial forecasting**. Chemical and Engineering News, EUA, p. 40-47, agosto 1976.

FARR, T. G. et al. **The Shuttle Radar Topography Mission**. Rev. Geophys., 45, 2007.

FERNANDES, S. C.; CERNESSON, F.; EID, N. J. **Avaliação de imagens de alta e muita alta resolução espacial como subsídio à gestão dos recursos hídricos**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005. João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005. 1 CD-ROM.

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. 1ª edição. São Paulo-SP, 2010.

FITZ, Paulo Roberto. **Geração de múltiplos critérios para apoio à decisão em dados geoprocessados. Um estudo de caso: a microbacia hidrográfica de Inhandava, em Maximiliano de Almeida, RS**. 2005. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

FRANCISCO, C. E. S.; COELHO, R.M.; TORRES, R.B.; ADAMI, S.F. **Análise multicriterial na seleção de bacia hidrográfica para recuperação ambiental**. Ciência Florestal, Santa Maria, v.18, n.1, p.1-13, jan.-mar, 2008.

GOODCHILD, M. F. **The technological setting of GIS**. In: **Geographical Information System: Principles and Applications**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

GOODCHILD, M. **Geographical data modeling**. Computers & Geosciences, 18(4): 401-408, 1992.

GUIMARÃES, C. L. **Geotecnologias na determinação do assoreamento do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB: Um desenvolvimento metodológico.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

HASENACK, Henrich. **O geoprocessamento no processo de tomada de decisão.** In: Boletim Gaúcho de Geografia n. 20. Porto Alegre: AGB/PA, 1995.

INPE. **Processamento Digital de Imagens.** 1. ed. São José dos Campos, SP, p. 45, 1996.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Curso de análise espacial de dados geográficos. 2010. Natal-RN. 2011. 76p. (Apostila).

JANKOWSKI, P. **Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods.** International Journal of Geographical Information Systems, Abingdon, v. 9, n. 3, p. 251-273, 1995.

LILLESAND, T.M.; KIEFIR, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation.** John Wiley & Sons, Inc. New York. 1979/1995.

LIMA, J. R. de. **Especial: desertificação e semi-árido.** (2005): Ministério da Educação, Boletim 10 -, 2005. 03p.

MALCZEWSKI, J. **GIS and Multicriteria Decision Analysis.** New York: JohnWiley & Sons, Inc, 1999.

MALCZEWSKI, J. **GIS -based land-use suitability analysis: a critical overview.** Progress in Planning. v. 62, n. 1, p. 3-65, Jul. 2004.

MARTINO, Joseph P. **Technological forecasting for decision making.** 3. ed. New York: Mc Graw-Hill Inc., 1993.

MARTINS, V. B. **Metodologia baseada em sistema de informação geográfica e análise multicritério para a seleção de áreas para a construção de um repositório para o combustível nuclear usado.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

MELLO, J.C.C.B.S. de; GOMES, E. G.; LETA, F.R.; PESSOLANI, R.B.V. **Conceitos básicos do apoio multicritério à decisão e sua aplicação no projeto Aerodesign.** Engevista, Niterói, v. 5, n. 8, p. 22-35, 2003.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Mapas das áreas susceptíveis à desertificação no Brasil.** Secretaria de Recursos Hídricos. Universidade Federal da Paraíba, 2007.

MORAIS NETO, J. M. de. **Gestão de Riscos a Desastres ENOS (El Niño Oscilação Sul) no Semi-árido Paraibano: uma análise comparativa.** 2003. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, 2003.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). p 208, 2001.

NAPOLEÃO, R. P. **Zoneamento ambiental como subsídio à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Capivari (SP).** 2003. 192 f. Dissertação (Mestrado em Geociência e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1995.

PANBRASIL – **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca.** Edição comemorativa 10 anos da CCD. Ministério do Meio Ambiente - Secretaria de Recursos Hídricos. 2004. 220p.

PARAÍBA. **Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba - Relatório.** ZAP-B-D-2146/1. 1978.

PARAÍBA. PDRH-PB - Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba. João Pessoa/PB: Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA)/Governo do Estado da Paraíba. 2006.

PDRH-PB. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba.** João Pessoa/PB: SEMARH/Governo do Estado da Paraíba. 1996 (CD-ROM).

PESTANA, A. **Decisões com o método de análise hierárquica.** Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2005. 20p. (Apostila).

PINHEIRO, M. R. C. **Avaliação dos usos preponderantes e da qualidade da água como subsídios para os instrumentos de Gestão dos Recursos Hídricos aplicada à Bacia Hidrográfica do Rio Macaé.** 2008. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos – RJ. Macaé, 2008.

PIOLA, S.F.; VIANNA, S.M.; VIVAS-CONSUELO, D. **Estudo Delphi: atores sociais e tendências do sistema de saúde brasileiro.** Caderno de Saúde Pública do Rio de Janeiro, n.18, p.181-190, 2002.

RAMOS, R. A. (2000). **Localização industrial: um modelo especial para o noroeste de Portugal.** Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal. 2000.

RAO, M.S.V.C.; SASTRY, P.D.; YADAR, K.; KHAROD, S.K.; PATHAN, P.S.; DHINWA, K.L.; MAJUMDAR, D.; PHATA, K. **A weighted index model for urban suitability assessment – a GIS approach.** Bombay: Metropolitan Regional Development Authority, 1991. 134p

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia transdisciplinar.** 2000. Juiz de Fora – MG. 2000.

RUHOFF, A. L. **Gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas: modelagem ambiental com a simulação de cenários preservacionistas**. 2004. 105 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2004.

SAATY, T. L. (1977). **A scaling method for priorities in hierarchical structures**. Journal of Mathematical Psychology, v. 13, n. 3, p.234-281.

SAATY, T. L. (1980). **The Analytic Hierarchy Process**. New York McGraw Hill.

SAATY, T. L. (1987). **Concepts, theory, and techniques: rank generation, preservation, and reversal in the analytic decision process**. Decision Sciences, v. 18, n. 2, p. 157-177.

SOUSA, R. F. de. **Geoprocessamento no estudo das terras com vista ao desenvolvimento sustentado, com diminuição dos riscos**. 2007. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

STEVENS, S. S. **On the theory of scales of measurement**. Science, v. 103,n.2684, p. 677-680, 1946.

STORE, R.; KANGAS, J. **Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modeling**. Landscape and Urban Planning. v.55, p.79-93. Jul. 2001.

TEIXEIRA, M. B. **Emprego de uma metodologia multicritério na avaliação do estudo de impacto ambiental de hidrelétricas**. 2006. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

UNCCD. **Convención de las naciones unidas de lucha contra La desertificación y La sequía**. 2007. Proceso de implementación em América Latina y El Caribe (1994-2006). 2ª edición. 381p.

VALENTE, R.O.A. **Definição de áreas prioritárias para conservação e preservação florestal por meio da abordagem multicriterial em ambiente SIG**. 2005. 121 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

VALERIANO, M. M. de. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. 2004. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2004.

VETTORAZZI, C. A. **Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos**. 2006. 78p. Tese (Doutorado em Topografia). Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Piracicaba, 2006.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo-SP: McGraw-Hill do Brasil, 245 p. 1975.

VOOGD, H. (1983) - **Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning**. London: Pion Ltd.

WRIGHT, J.T.C. e GIOVINAZZO, R.A. DELPHI – **Uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo**. Caderno de Pesquisas em Administração, v. 01, nº 12, p.12-16, 2000

WINTERFELDT, D. Von; Edwards, W. (1986), **Decision Analysis and Behavioural Research**. Cambridge: Cambridge University Press.