

Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE

Cristiano Alves da Silva ¹

Fábio de Paiva Nunes ²

¹ Especialista em Geoprocessamento - UECE
Campus do Itaperi - 60.740-903 - Fortaleza - CE, Brasil
geocristiano@gmail.com

² Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente - UFC
Campus do Pici - 60.455-970 – Fortaleza – CE, Brasil
fabiologista@yahoo.com

ABSTRACT: This study was submitted and approved in the Specialization Course of Applied Geoprocessing to Environmental Analysis and Water Resources of the Universidade Estadual do Ceará, as a partial requirement to obtain the title of specialist in geoprocessing. The goal of this study was to generate an environmental vulnerability map of the Baturité Environmental Protection Area, in the portion located within the boundaries of the municipality of Pacoti. This area has a predominance of the atlantic rain forest, with local temperatures varying between 19 and 22°C. Such factors contribute to make it a wet island in the arid landscape of the Caatinga. Facing these peculiarities, this region is suffering from severe degradation of its natural resources. This situation justifies the need for an integrated environment analysis approach for the region, a system composed of multiple inter-related variables which interacts with other systems. The AHP - Analytic Hierarchy Process methodology was used for the multi-criteria analysis of a large number of qualitative factors. Through a hierarchical structuring of the problem it was possible to define the importance of each criteria in the decision-making process, ensuring an integrated analysis of the major environmental factors which combined determine the environmental fragility of the studied region. As a result of this methodology it was possible to generate an environmental vulnerability map and identify areas where there is a greater pressure on natural resources, thus guiding the decision-making process to mitigate the effects of degradation and to ensure the protection of this environment.

Palavras-chave: remote sensing, analytic hierarchy process, multi-criteria analysis, sensoriamento remoto, processo analítico hierárquico, análise multicriterial.

1. Introdução

A área objeto deste estudo está localizada em uma zona considerada exceção no contexto do Estado do Ceará, denominada Maciço de Baturité, que de acordo com Souza in (LIMA, SOUZA E MORAIS, 2000) é um enclave úmido na paisagem árida do Ceará. Devido a esse caráter de exceção em 1990 foi instituída pelo Governo do Estado do Ceará a APA - Área de Proteção Ambiental de Baturité, sendo essa a primeira Unidade de Conservação desta categoria criada pelo Estado.

A paisagem serrana do Maciço de Baturité apresenta uma grande exuberância natural. Nesta região predomina uma mata úmida classificada por Souza in (CEARÁ. FNMA/FCPC, 1994) como Arboreto Climático Perenifólio, resquício de mata atlântica, contrastando com a vegetação de caatinga que recobre a depressão sertaneja que circunda o maciço.

Tal ambiente é fruto da ação combinada de fatores como relevo, direção dos ventos e distância do litoral, fatores estes que colocam essa região entre as regiões mais pluviosas do Estado do Ceará, com uma incidência de totais pluviométricos elevados, exercendo também influência direta na temperatura local que varia em torno de 19 e 22°C.

Diante destas peculiaridades, o município de Pacoti localizado a 90km da Capital Fortaleza vem despontando como um importante pólo turístico (Vide Figura 01). Essa atividade está sendo responsável por um crescimento significativo dos seguimentos econômicos ligados à hospedagem, artesanato e alimentação. Entretanto estes benefícios se concentram principalmente nas proximidades da zona urbana de Pacoti, em quanto às populações mais afastadas sofrem com a falta de políticas públicas voltadas para a agricultura, que é a principal atividade econômica destas populações. Nessas áreas, vários impactos ambientais podem ser citados como: desmatamento indiscriminado, assoreamento de riachos, queimadas, contaminação dos recursos hídricos por agrotóxicos dentre outros.

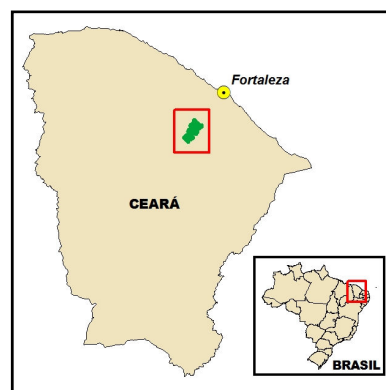


Figura 01. Localização da área de Estudo

Nesse sentido o presente trabalho tem como objetivo mapear a região do município de Pacoti, localizada dentro da APA de Baturité, quanto a sua vulnerabilidade ambiental, fornecendo informações que subsidiarão nas tomadas de decisão por parte dos órgãos governamentais bem como da sociedade civil, na busca de alternativas sustentáveis de uso do solo, complementando a atividade turística do município e contribuindo para o direcionamento de ações que visam o desenvolvimento com responsabilidade ambiental desta região.

Para realizar o mapeamento da vulnerabilidade, através de uma análise integrada do ambiente, abordando a região como um sistema composto por múltiplas variáveis que se inter-relacionam entre si e com outros sistemas, foi utilizada a estrutura lógica de análise e integração denominada AHP - Analytic Hierarchy Process ou Processo Analítico Hierárquico.

O método AHP, desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 70, consiste na criação de uma hierarquia de decisão, sendo essa hierarquia composta por níveis hierárquicos que permitem uma visão global das relações inerentes ao processo. Para estabelecer a importância relativa de cada fator da hierarquia são elaboradas matrizes de comparação para cada nível, onde os resultados das matrizes são ponderados entre si.

O modelo hierárquico de Saaty (1980) é um processo de escolha baseada na lógica de comparação par a par (pairwise comparison), em que diferentes fatores que influenciam na tomada de decisão são organizados hierarquicamente, e comparados entre si, e um valor de importância relativa (peso) é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, conforme uma escala pré-definida que expressa a intensidade com que um fator predomina sobre outro, em relação à tomada de decisão.

2. Metodologia de Trabalho

Para realizar o mapeamento da vulnerabilidade ambiental da área estudada, foi necessário o mapeamento e cruzamento de três fatores considerados decisivos para a determinação desta vulnerabilidade: declividade, área legal e vegetação / uso e ocupação.

O Plano de Informação – PI de Declividade foi gerado a partir de um Modelo Digital do Terreno - MDT, sendo este mapeamento composto por classes de declividade determinadas com base na vulnerabilidade ambiental proporcionada pela mesma.

Já o PI denominado Área Legal consiste na espacialização da resolução do CONAMA Nº 303, de 20 de março de 2002, que dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de áreas de

preservação permanente - APP. Com base nesta resolução, na área de estudo aplicam-se o artigo 3º, inciso I, alínea a¹; inciso III, alínea b² e inciso V³.

Para mapear as APPs dos Rios e Riachos da área de estudo, foi necessário delinear todos os recursos hídricos locais. Para tanto foi usado o mesmo MDT utilizado na confecção do PI de Declividade, para traçar de maneira automatizada toda a drenagem de acordo com a topografia local. No tocante as feições da hidrografia como açudes e lagos, estes foram mapeados de acordo com a classificação supervisionada realizada na confecção do PI de Vegetação / Uso e Ocupação.

Por fim, estas feições foram cruzadas, contemplando assim todos os recursos hídricos locais, possibilitando a realização dos *buffers*⁴ de acordo com as distâncias especificadas pela resolução do CONAMA.

Ainda com base nesta resolução, foram traçadas as APPs dos topos de morro, utilizado um MDT de grade retangular no *software* SPRING 4.3 para delimitar o um terço superior do morro, que de acordo com a resolução do CONAMA é considerada área de preservação.

O mapeamento da Vegetação / Uso e Ocupação da área de estudo foi realizado através do emprego de técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, tendo como base uma imagem orbital do satélite SPOT-5 imageada em setembro de 2004.

Com base nesta imagem orbital foi realizada uma classificação supervisionada a partir de 92 amostras identificadas em campo. De acordo com o Tutorial de Geoprocessamento do DPI/INPE - Divisão de Processamento de Imagens, Brasil (2006), a classificação consiste no processo de extração de informações de imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos. Neste contexto, a classificação supervisionada é realizada a partir do treinamento, ou seja, do reconhecimento da assinatura espectral das classes, que é realizado com base nas regiões da imagem em que o usuário dispõe de informações que permitem a identificação de uma classe de interesse.

O classificador utilizado foi o Battacharya disponível no *software* SPRING 4.3. De acordo com o Tutorial do SPRING, Brasil (2006), este classificador utiliza a medida da distância de Battacharya, para medir a separabilidade estatística entre um par de classes espectrais. Ou seja, mede a distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais.

De posse destes três PIs foi utilizado o método de análise multicriterial passível de integração em ambiente SIG denominado AHP (*Analytic Hierarchy Process*) ou Processo Analítico Hierárquico.

Essa teoria foi desenvolvida por Thomas L. Saaty na década de 70, e definida por ele como reflexo do que parece ser um método natural de funcionamento da mente humana. Uma vez que, ao defrontar-se com um grande número de elementos, controláveis ou não, que abrangem uma situação complexa, ela os agrega em grupos, segundo propriedades comuns. Essa decomposição do problema em grupos, ou níveis, foi definida por ele como hierarquia, isto é, um sistema de níveis estratificados, cada um consistindo em tantos elementos, ou fatores. (SAATY, 1991).

¹ Constitui Área de Preservação Permanente a área situada em faixa marginal, medida a partir do nível mais alto, em projeção horizontal, com largura mínima de trinta metros, para cursos d'água com menos de dez metros de largura.

² Constitui Área de Preservação Permanente a área situada ao redor de lagos e lagoas naturais, em faixa com metragem de mínima de cem metros, para as que estejam em áreas rurais, exceto os corpos d'água com até vinte hectares de superfície, cuja faixa marginal será de cinquenta metros.

³ Constitui Área de Preservação Permanente a área situada no topo de morros e montanhas, em áreas delimitadas a partir de curva de nível correspondente a dois terços da altura mínima da elevação em relação a base.

⁴ *Buffer* é um polígono criado a partir da distância especificada de uma determinada feição.

O processo de decisão utilizando AHP desenvolve-se ao longo de seis etapas, agrupadas em três estágios, listados a seguir e explicados em maior nível de detalhe na sequência: (Vide Figura 2).

- Estágio 01 - Estruturação da Hierarquia de Decisão
 - Estruturação da hierarquia;
- Estágio 02 - Construção da Matriz de Comparação Pareada
 - Construção da matriz;
 - Verificações de consistência;
 - Definir o valor da importância relativa (peso) de cada fator;
- Estágio 03 - Priorização das Alternativas e Definição das Classes de Vulnerabilidade
 - Priorização das alternativas;
 - Classificação final.

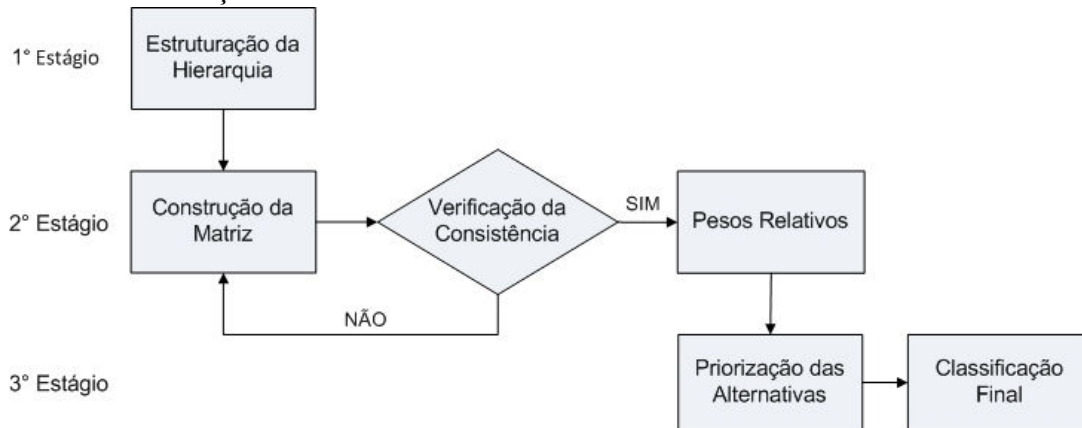


Figura 2. Estágios do Processo AHP

2.1. Estágio 01 - Estruturação da Hierarquia de Decisão

Esta etapa consiste na estruturação de uma hierarquia possibilitando definir a influência mútua entre os mesmos, onde as entidades de um grupo influenciam as de outro e são influenciadas pelas entidades de apenas outro.

No topo da hierarquia está a objetivo, no caso definir a vulnerabilidade ambiental. No segundo nível estão os atributos que irão determinar as classes de vulnerabilidade, compostos pelos PIs Vegetação / Uso e Ocupação, Declividade e Área Legal. No último nível estão as feições mapeadas em cada um dos PIs que compõem o segundo nível. (Vide Figura 3)

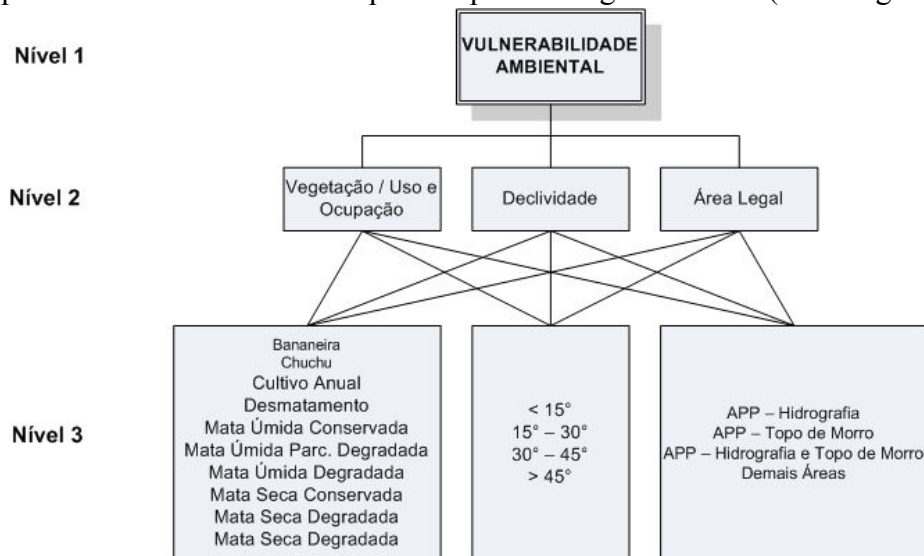


Figura 3. Hierarquia de Vulnerabilidade Ambiental

Para determinar a importância relativa entre os elementos que compõem os níveis desta hierarquia, foi definida a relação de importância entre as evidências, sendo esta relação utilizada como *input* de uma matriz de comparação pareada, que definiu os pesos relativos dos elementos de decisão.

2.2. Construção da Matriz de Comparação Pareada

De acordo com Silva *et al.* (2004) a técnica AHP baseia-se numa matriz quadrada de $n \times n$, de comparação entre os n critérios, onde as linhas e as colunas correspondem aos critérios, sendo o resultado igual à importância relativa do critério da linha face ao critério da coluna.

Neste contexto os valores de entrada nas matrizes foram obtidos com base na comparação dois-a-dois dos fatores que influenciam na vulnerabilidade ambiental da área. A partir desta comparação pareada foi definido o critério de importância relativa entre os fatores, conforme uma escala pré-definida de 1 a 9, onde o valor 1 equivale ao mínimo, e 9 o máximo de importância de um fator sobre o outro.

De cada matriz de comparação pareada foram extraídos seus *autovetores*, que correspondem ao grau de importância relativa para cada fator considerado. Os *autovetores* resultantes da matriz de comparação dos atributos do segundo nível da hierarquia, no caso os PIs, são denominados NOTAS e os resultantes da matriz de cada conjunto de atributos do terceiro nível, ou seja, as feições mapeadas em cada PI, são chamados de PESOS.

Neste contexto, segue no Quadro 1 abaixo, as NOTAS e PESOS obtidos, representando o grau de influência exercido por cada fator para determinação da vulnerabilidade ambiental.

Quadro 1. Resultado das Matrizes de Comparação Pareada

Matriz de Comparação Pareada dos Pis	
PI	NOTA
Vegetação/Usos e Ocupação	0,5978
Área Legal	0,2281
Declividade	0,1741
Matriz de Comparação Pareada dos Atributos dos Pis	
PI de Vegetação Usos e Ocupação	PESO
Desmatamento	0,2876
Cultivo Anual	0,2106
Plantio de chuchu	0,1489
Mata Seca Degradada	0,0984
Plantio de Bananeira	0,0848
Mata Seca Parcialmente Degradada	0,0556
Mata Úmida Degradada	0,0434
Mata Seca Conservada	0,0315
Mata úmida Parcialmente Degradada	0,0226
Mata Úmida Conservada	0,0165
PI de Área Legal	PESO
APP - Rio e Morro	0,5933
APP - Topo de Morro	0,2452
APP - Rio	0,1231
Demais Áreas	0,0384
PI de Declividade	PESO
> 45°	0,5651
30° - 45°	0,2696
15° - 30°	0,1260
< 15°	0,0393

2.3. Priorização das Alternativas e Definição das Classes de Vulnerabilidade

Este estágio é o último do processo de decisão utilizando o método AHP. Nesta etapa os *autovetores*, NOTAS e PESOS, resultantes das matrizes de avaliação são utilizados para compor a classificação final, ou seja, o PI resultante do cruzamento dos três PIs mapeados, refletindo neste a vulnerabilidade ambiental da área estudada.

Para realizar o cruzamento dos PIs optou-se pelo formato *raster*. Isso porque neste formato cada *pixel* do PI resultante será fruto do cruzamento dos *pixels* dos outros três PIs existentes na mesma coordenada *x,y*. Para tanto foi necessário transformar os PIs do formato vetorial para o formato matricial, onde cada pixel passou a conter o PESO definido por sua matriz. (Vide Figura 4)

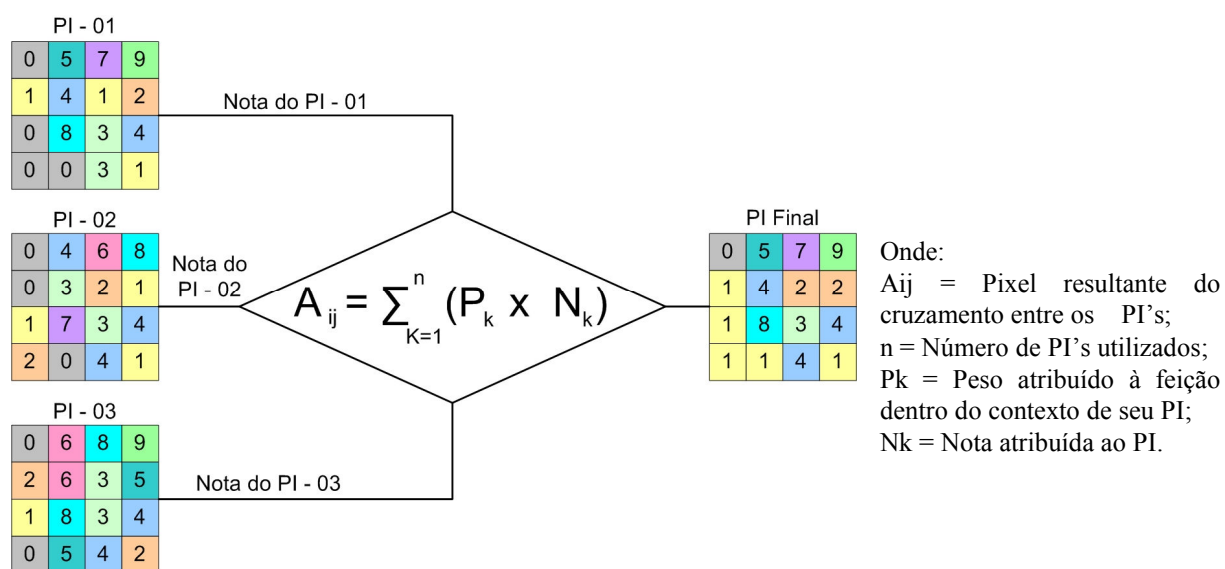


Figura 4. Ilustração do processo de cruzamento dos PIs

O resultado deste cruzamento é o PI de Vulnerabilidade Ambiental, fruto da análise integrada do ambiente, abordando a região como um sistema composto por múltiplas variáveis que se inter-relacionam entre si e com outros sistemas.

O PI de Vulnerabilidade Ambiental obteve valores variando entre 0 e 0,3596 onde 0 representa a ausência e 0,3596 o máximo de vulnerabilidade. Estes valores foram divididos em quatro classes distintas de vulnerabilidade, conforme os intervalos ilustrados na Tabela 1. Posteriormente foi realizada uma nova conversão dos dados, agora do formato matricial para o vetorial. A partir destes dados foi possível calcular a área em hectares de cada uma das classes, bem como construir o layout final do mapa de vulnerabilidade ambiental da APA do Maciço de Baturité localizada dentro dos limites do município de Pacoti. (Vide Figura 5)

Tabela 1. Intervalos das Classes de Vulnerabilidade

Intervalo	Vulnerabilidade	Área (ha)	%
0 - 0,042787458	Baixa	918,88	14,88
0,042787458 - 0,071123454	Moderada	2.413,60	39,10
0,071123454 - 0,098722602	Alta	1.343,87	21,77
0,098722602 - 0,3596	Muito Alta	1.497,32	24,25

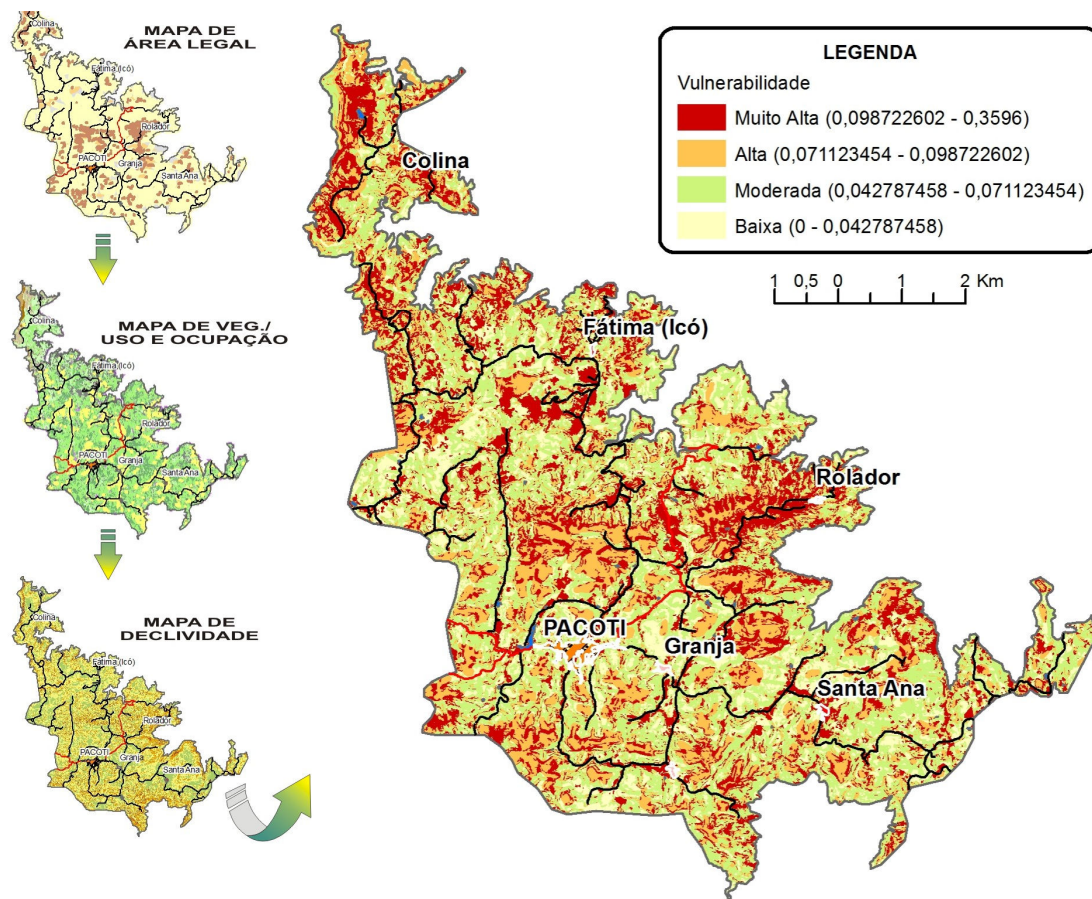


Figura 05. Mapa de Vulnerabilidade Ambiental

3. Resultados e Discussão

Como foi observado no decorrer deste estudo, a região da APA de Baturité localizada dentro dos limites do município de Pacoti, é uma região extremamente frágil do ponto de vista ambiental. Tal fato se deve a forte relação existente entre os vários fatores ambientais que compõem este geossistema.

Com base no PI Vegetação / Uso e Ocupação foi possível observar que essa região vem sofrendo um forte desequilíbrio de suas funções ambientais causado pelo desmatamento indiscriminado e por práticas inadequadas de cultivo. De acordo com este mapeamento, apenas 20,37% da vegetação denominada Mata Úmida não se encontra degradada e somente 11% da vegetação de Mata Seca foi classificada como conservada. As áreas mais degradadas estão localizadas na porção centro-norte da área de estudo, entre os distritos de Fátima e Colina, assim como na porção centro-leste, nas proximidades da localidade de Rolador. Nessas regiões foram detectadas as maiores incidências de desmatamento para realização de cultivos anuais como arroz, milho e feijão.

Esses cultivos são realizados geralmente no período chuvoso, ou seja, no início do primeiro semestre do ano, sendo feita a colheita por volta do mês de junho e julho, ficando o solo desprotegido durante o restante do ano e principalmente durante o início da estação chuvosa, ocasionando intenso processo de lixiviação do solo, que acarreta na perda de sua fertilidade, bem como a perda progressiva do mesmo. Em algumas regiões foram identificadas áreas onde este processo evoluiu de tal maneira que já não existe mais solo, podendo ser notado o afloramento da rocha subjacente.

Já na porção sul da área de estudo, nas proximidades da sede de Pacoti, o plantio de chuchu é a atividade de maior impacto. Estes cultivos estão localizados principalmente nos fundos de vale dos rios e riachos avançado sobre as encostas, destruindo a mata ciliar

causando assoreamento e provocando a contaminação das águas através dos resíduos dos agrotóxicos aplicados no cultivo.

Analisando o mapeamento realizado no PI de Declividade fica evidente a forte influência exercida por esse fator na vulnerabilidade deste ambiente. De acordo com este mapeamento 70% da área foi classificada como sendo de vulnerabilidade moderada, alta e restritiva, denotando a forte dissecação do relevo desta região. Vale salientar que essa classificação diz respeito à vulnerabilidade natural da declividade, sendo esta influenciada de forma direta pela forma de uso dada a sua superfície, de modo que, quanto mais desprotegido o solo mais vulnerável aos efeitos erosivos.

Quando analisamos o PI de Área Legal fica evidente a fragilidade ambiental da área estudada. Segundo o mapeamento deste PI, 45,36% da área total estudada está enquadrada como APP, com base na resolução do CONAMA nº 303 de março de 2002, justificando assim a necessidade de um planejamento que garanta a sustentabilidade desta região.

Com base nestas informações foi possível utilizar o método AHP para determinar a fragilidade ambiental desta região, chegando à conclusão que quase 50% da área estudada possui vulnerabilidade alta e muito alta. Sendo constatada através da observação do mapa de vulnerabilidade uma concentração maior destas áreas no centro e no norte da área de estudo. Nestas áreas prevalece um relevo muito acidentado, sendo na região central onde se encontram as áreas mais elevadas do município, chegando a atingir a cota de 1030 metros de altitude. Já na região norte se destaca a vertente oriental do maciço com declividades superiores a 45°. Nesta região são comuns as práticas rudimentares de agricultura, como desmatamentos e queimadas para dar lugar a cultivos anuais.

Diante de todas essas informações esperasse que as mesmas sejam utilizadas como subsídio nas tomadas de decisão por parte dos órgãos governamentais bem como da sociedade civil, afim de mitigar os efeitos da degradação constatada e proteger as áreas identificadas como sujeitas a essa degradação, garantindo a preservação do meio ambiente através de programas de orientação técnica que garantam aos agricultores, residentes nas áreas mais distantes da região turística do município, desenvolver suas atividades de maneira sustentável.

Referências Bibliográficas

CEARÁ. Fnma/fpc. Ministério do Meio Ambiente - Mma. **Geossistemas e potencialidades dos recursos naturais de Baturité e áreas sertanejas periféricas (Ceará)**. Fortaleza: Funceme, 1994. 102 p.

LIMA, Luiz Cruz; SOUZA, Marcos José Nogueira de; MORAIS, Jäder Onofre de. **Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará**. Fortaleza: Funceme, 2000. 268 p.

SAATY, Thomas L.. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Mcgraw-hill, Makron, 1991. Tradução e Revisão Técnica Wainer da Silveira e Silva.

SAATY, Thomas L.. **The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: Mcgraw-hill, 1980. 287 p.

SILVA, Antônio Nelson Rodrigues da et al. **SIG: uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes: uma ferramenta 3D para análise ambiental urbana, avaliação multicritério, redes neurais artificiais**. São Carlos: Ed. Do Autores, 2004.

SPRING: Tutorial de Geoprocessamento. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial>>; Acesso em: 26.jul.2006.

Tutorial SPRING: 10 aulas. Disponível em: <http://www.red-spring.com.ar/spring/Roteiros_10_aulas>. Acesso em: 26.jul.2006.