

ASPECTOS DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL AO PROCESSO EROSIVO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO-MA

Idevan Gusmão Soares ¹
Regina Célia de Oliveira ²
Luiz Carlos Araujo dos Santos ³

INTRODUÇÃO

Entende-se que a vulnerabilidade natural mostra a predisposição do ambiente frente a fatores naturais como: geomorfologia, geologia, pedologia e a sua estabilidade em relação à morfogênese e à pedogênese, enquanto que a vulnerabilidade ambiental é intensificada pela pressão antrópica (KLAIS *et al.*, 2012).

Dentre os métodos utilizados para mensurar o grau de vulnerabilidade ambiental tem-se o Análise Hierárquica Processual, desenvolvido por Saaty (1977), consiste na criação de uma hierarquia de decisão, composta por níveis de importância 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 (SILVA; NUNES, 2009).

Em estudos ambientais o uso de Sistemas de Informação Geográfica é importante, pois auxiliam na análise dos aspectos fisiográficos, dando base para o estudo da vulnerabilidade ambiental. O emprego do SIG auxilia tanto na análise da vulnerabilidade local decorrente das ações antrópicas ou mesmo diante das mudanças naturais ocorridas no próprio ambiente, possibilitando o planejamento e gestão adequada para as áreas de riscos.

Assim, o trabalho tem como área de estudo a bacia hidrográfica do rio Preto (5.235,63 km²) que é um afluente da bacia do rio Munim. A bacia está situada entre as coordenadas geográficas: 3°0'00" - 4°0'00" S e 42°55'0" - 43°55'00" W. Desta forma, o objetivo deste trabalho é identificar as áreas de vulnerabilidade ambiental ao processo erosivo da bacia hidrográfica do rio Preto-MA como subsídio ao planejamento e à gestão ambiental.

METODOLOGIA

¹ Doutorando do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, i203560@dac.unicamp.br;

² Profa. Dra. do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, regina5@unicamp.br;

³ Professor orientador: Prof. Dr. do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, luizcarlos.uema@gmail.com.

Os parâmetros físicos levados em consideração no estudo da vulnerabilidade ambiental da bacia dizem respeito a geomorfologia, pedologia, declividade, geologia, considera-se a integração desses parâmetros associado ao uso e cobertura da terra com base na sua estabilidade em relação à morfogênese e à pedogênese, almejando contribuir na mitigação de áreas vulneráveis.

Em relação a fisiografia utilizou-se os *shapefiles* de geologia da CPRM (2012); solos do Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC, 2013); unidades geomorfológicas do IBGE (2019). Todos os dados foram reprojetados para SIRGAS 2000, Fuso 23S e recortado para o limite da bacia com uso do QGIS 2.18.28.

Para a declividade utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) do TOPODATA do INPE (2011). Estes dados correspondem às folhas: 03S45_ZN e 03S435_ZN. Em seguida, utilizou-se o algoritmo *slope*, após esta etapa, procedeu-se a reclassificação da declividade empregando-se o algoritmo *r.reclass* do QGIS, seguindo a orientação da EMBRAPA (1979).

Quanto ao uso e cobertura da terra, realizou-se, a aquisição de imagens orbitais do satélite Landsat-8 de órbitas/ponto: 220/62 e 220/63, datadas de 04/05/2019. Essas imagens foram adquiridas no site do Serviço de Levantamento Geológico Americano. Em seguida as imagens foram reprojetadas no QGIS e passaram pelo processo de empilhamento das bandas 6(R), 5(G) e 4(B) através de mosaico.

A imagem foi importada para o SPRING 4.3.3 onde efetuou-se o mapeamento do uso e cobertura da terra numa escala de 1:250.000, utilizando-se das técnicas de análise visual de imagens de satélite com base nos elementos de fotointerpretação. Assim, realizou-se a vetorização manual das classes com o uso das ferramentas da edição topológica do SIG e por conseguinte inserção das classes, as quais foram classificadas de acordo com o manual técnico de vegetação do IBGE (2012).

Entende-se que para cada componente que compõe e influencia a dinâmica da paisagem da bacia há uma importância relativa para o processo de vulnerabilidade ambiental a erosão laminar, e com a aplicação do método AHP obtém-se o peso de cada elemento com o intuito de corroborar para alcançar o objetivo deste trabalho.

O processo de decisão utilizando AHP desenvolve-se ao longo de 6 etapas, agrupadas em 3 estágios, listados a seguir e explicados na sequência (Silva; Nunes, 2009): **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 e classificação final.

Estágio 1 - Estruturação da Hierarquia de Decisão, segundo Silva e Nunes (2009, p.5438), “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 o propósito geral do problema, no caso definir a vulnerabilidade ambiental. No segundo nível estão os critérios que irão determinar as classes de vulnerabilidade, compostos pelos Planos de Informação - PI. No último nível estão as alternativas, que consiste nos atributos de cada PI.

Para determinar a importância relativa entre os elementos que compõem os níveis dessa hierarquia, define-se a relação de importância entre as evidências, sendo esta relação utilizada como *input* de uma matriz de comparação pareada, que define os pesos relativos dos elementos de decisão (SILVA; NUNES, 2009).

Os valores de entrada nas matrizes foram obtidos com base na comparação pareada dos fatores que influenciam na vulnerabilidade. A partir desta comparação foi definido o critério de importância relativa entre os fatores, conforme o uso da escala de valores AHP para comparação pareada. Salienta-se que não foi construída a matriz, ela foi obtida por meio de *download* no site: <https://www.pyzdekstitute.com/blog/six-sigma/ahp-spreadsheet.html>. Esta matriz foi produzida por Pyzdek (2019) onde estão inseridas todas as fórmulas necessárias para aplicação da técnica AHP. Desta forma, foram inseridas na matriz apenas a descrição dos PIs e o peso da comparação paritária, conforme a escala de prioridades do AHP.

Da 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 pesos (SILVA; NUNES, 2009).

O autovalor máximo corresponde a 5,41, aplicando a fórmula do índice de consistência tem-se: $I.C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 5,41 - 5 / 5 - 1 = 0,10$. Este resultado mostra que a matriz de comparação é consistente. Por ser uma matriz de 5ª ordem o índice randômico é 1,12 (SAATY, 1980). Desta forma, a razão de consistência é $= IC / IR = 0,10 / 1,12 = 0,09$ com este resultado comprova-se a aceitabilidade e consistência da matriz.

O objetivo da aplicação da AHP neste trabalho refere-se à obtenção do peso dos critérios, por tanto, o estágio três não se faz necessário executar. Logo, para identificação dos pesos das alternativas que compõem o terceiro nível da hierarquia foi aplicada a metodologia proposta por Crepani *et al.* (2001) que baseia-se na Ecodinâmica de Tricart (1977).

No intuito de espacializar e mensurar os diferentes graus de vulnerabilidade ambiental produziu-se mapas de vulnerabilidade natural para os temas geologia, pedologia, geomorfologia e declividade utilizando-se o ArcGIS 10.5.

Conforme os processos morfodinâmicos são atribuídos valores que variam de 1,0 a 3,0. As situações onde há o predomínio dos processos de pedogênese se atribuem valores próximos de 1,0; nas situações intermediárias se atribuem valores ao redor de 2,0 e situações de predomínio dos processos de morfogênese se atribuem valores próximos de 3,0.

Em relação às temáticas são utilizados critérios para definição da categoria morfodinâmica. Neste sentido, os critérios da Geologia envolve informações relativas à história da evolução geológica e o grau de coesão das rochas; a declividade guarda relação direta com a velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética e, portanto, com a velocidade das massas de água em movimento responsáveis pelo *runoff*. Nos solos considera-se o desenvolvimento do perfil. Nos solos rasos prevalecem os processos erosivos da morfogênese que geram solos pouco desenvolvidos, já as condições de estabilidade permitem o predomínio da pedogênese gerando solos profundos. Quanto ao uso e cobertura, a densidade de cobertura vegetal é um fator de proteção da unidade contra os processos morfogenéticos que se traduzem na forma de erosão.

A partir da determinação dos critérios procedeu-se à etapa de atribuição dos pesos. Nesta etapa, as informações contidas em cada tema receberam uma nota conforme a vulnerabilidade de cada elemento presente na área-objeto a processos de perda de solos.

Após a atribuição das notas, para os atributos dos PIs que apresentaram como resultado mapas de vulnerabilidade para cada temática. Procedeu-se, então, à etapa de inserção dos pesos dos temas, de modo a diferenciar o grau de importância da vulnerabilidade à erosão. Para o tema declividade, conforme a aplicação da técnica AHP, foi estabelecido o peso 17,4%, para geologia 5,8% e para pedologia, geomorfologia e uso e cobertura da terra 25,4%, 10,1%, 41,4%, respectivamente.

Depois da organização de todos os mapas de vulnerabilidade, foi feita a integração dos mesmos através da operação de álgebra de mapas. Nessa etapa, utilizou-se a calculadora *raster* para inserir a equação de soma, que relaciona os mapas de vulnerabilidade e os pesos dos temas estabelecidos. Esse procedimento permitiu a produção mapa síntese de vulnerabilidade ambiental.

Com o objetivo de delimitar as Unidades de Planejamento de Recursos Hídricos (UPRH) da bacia, recorreu-se ao *shapefile* das bacias hidrográficas otocodificadas que pertence à base de dados vetoriais da ANA (2012). Assim, estabeleceu-se o nível 4 para a

Quanto a classe moderadamente estável, ela concentra 39,04% da UPRH do riacho do Gavião, sendo a floresta estacional semidecidual submontana, os Tabuleiros de Chapadinha, e as declividades entre 0-3% e 3-8% decisivas para essa condição. Já em relação às unidades geológicas identificadas na área abrangida por essa classe, sua influência assimila-se ao da classificação estável descrita no parágrafo anterior.

A área medianamente estável/vulnerável compreende 24,26%, tal equilíbrio ecodinâmico é estabelecido pelo Planalto Dissecado do Itapecuru, Argissolo Vermelho-Amarelo concrecionário, declividades de 8-20%. Observa-se que a agricultura, pastagem, área urbana, silvicultura e vegetação secundária estão presentes, no entanto, isso está associado a uma atenuação da instabilidade desses usos decorrente da presença do Latossolo Amarelo, Tabuleiros de Chapadinha, declividades entre 0-3% e 3-8%.

A agricultura, pastagem, área urbana, silvicultura, vegetação secundária, Grupo Barreiras e Itapecuru contribuíram para que 8,09% da área da UPRH do riacho do Gavião torna-se moderadamente vulnerável. Os Tabuleiros de Chapadinha, Planalto Dissecado do Itapecuru e Argissolo Vermelho-Amarelo, declividades entre 0 a 20% não geraram atenuação da instabilidade dessas áreas. A declividade (0 a 8%) e os Tabuleiros de Chapadinha poderiam proporcionar neste caso, a estabilização da bacia, porém juntos sua importância corresponde a 27,5%, ao passo que o tema uso e cobertura e geologia correspondem a 47,2%.

As áreas vulneráveis abrangem 0,26% da UPRH aludida, sendo a agricultura, pastagem, área urbana, silvicultura, vegetação secundária, os litotipos do Grupo Itapecuru e Depósitos Eólicos Continentais Antigos os componentes causadores. É preponderante nessas áreas instáveis o relevo suave-ondulado (3-8%), o Planalto Dissecado do Itapecuru e os Argissolos Vermelho-Amarelo concrecionário, porém o uso foi decisivo para vulnerabilidade ambiental, com destaque para a vegetação secundária.

Na UPRH do rio Mocambo cerca de 31,42% de sua área encontra-se estável decorrente do relevo tabular, as baixas declividades (0-3% e 3-8%), os Latossolos Amarelos, a floresta estacional semidecidual submontana, servindo de proteção do solo contra a erosão pluvial, a vegetação ripária que atenua o assoreamento e erosão das margens dos canais.

No tocante a moderada estabilidade constatou-se que ela abrange 16,92% sendo a savana arborizada e vegetação ripária as principais responsáveis por essa condição. As formas de relevo plano e suave-ondulado associados aos Tabuleiros de Chapadinha e o Latossolo Amarelo também contribuíram para esse contexto.

O meio *intergrade* compreende 29,34% da UPRH do rio Mocambo, entretanto, esse equilíbrio é proporcionado pelo abrandamento da instabilidade de componentes da paisagem.

Neste viés, o destaque está atrelado à ocorrência dos Plintossolos Argilúvicos que ficaram medianamente estável/vulnerável devido à presença da floresta estacional semidecidual submontana, Tabuleiros de Chapadinha, relevo plano e suave-ondulado.

A moderada vulnerabilidade abrange 12,77% e associa-se a presença das formações pioneiras, vegetação com influência marinha (Restinga), silvicultura, Lençóis Maranhenses, Neossolo Quartzarênico, Depósitos Eólicos Continentais Antigos. Salienta-se que a existência dos Latossolos Amarelos, Tabuleiros de Chapadinha e declividades entre 0 a 8% influenciaram na moderada vulnerabilidade de fragmentos de cultivos de soja e eucalipto.

A classe vulnerável é a de menor concentração (9,56%) na UPRH do rio Mocambo. A associação dos Lençóis Maranhenses, Neossolos Quartzarênicos, Plintossolos Argilúvicos, Depósitos Eólicos Continentais Antigos, agricultura, pastagem, área urbana, formações pioneiras, silvicultura, vegetação secundária favoreceram a instabilidade. Neste sentido, o uso urbano, a vegetação secundária e o cultivo de eucalipto foram preponderantes para vulnerabilidade ambiental, isto é, a atuação antrópica intensificou a instabilidade, haja vista que essas classes estão sobre litotipos dos Depósitos Eólicos Continentais Antigos e em Plintossolos Argilúvicos. Ao norte da bacia, contudo, a vulnerabilidade é natural devido a área ser composta por sedimentos inconsolidados.

Diferente das demais unidades, a UPRH rio Riachão apresenta apenas 15,94% de sua área em situação de estabilidade. Isto se deve aos componentes naturais da paisagem identificados na bacia, a saber: o relevo tabular com baixos declives, solo profundo com grande porosidade e permeabilidade, cobertura vegetal nativa favorecendo a estabilidade e a consequente proteção do solo ao processo erosivo laminar.

A moderada estabilidade abrange 27,51% sendo a floresta estacional semidecidual submontana e os declives de 3-8% primordiais para o domínio da pedogênese. A vegetação ripária, por sua vez, associa-se a estabilidade, entretanto, na UPRH em estudo ficou moderadamente estável pela ocorrência de declives de 8-20% e 20-45% próximos aos canais, consubstanciado aos Argissolos Vermelho-Amarelo e ao Planalto Dissecado do Itapecuru.

As interações entre os elementos naturais, a saber: os Tabuleiros de Chapadinha, Planalto Dissecado do Itapecuru, Latossolo Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo concrecionário, corpo d'água, floresta estacional semidecidual submontana, vegetação ripária, declividades entre 0-3% a 20-45%, condicionaram o predomínio da pedogênese. Destaca-se que tanto nesta classe quanto na estável o aspecto geológico não influenciou de modo efetivo na estabilidade e/ou instabilidade da bacia.

Cerca de 28,65% da unidade ficou em equilíbrio entre pedogênese e morfogênese proporcionada pela predominância de relevo ondulado, o solo do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo, Planalto Dissecado do Itapecuru e a floresta estacional semidecidual submontana.

As unidades geológicas Grupo Itapecuru e os Depósitos Eólicos Continentais Antigos da UPRH do rio Riachão não influenciaram na geração de vulnerabilidade, pois o relevo ondulado, o Argissolo Vermelho-Amarelo, o Planalto Dissecado do Itapecuru e a floresta estacional semidecidual submontana foram determinantes para o equilíbrio dessa unidade.

A moderada vulnerabilidade ocupa 12,20% da UPRH sendo o uso e cobertura da terra o tema mais significativo para o predomínio da morfogênese. As classes que favoreceram a intensificação da vulnerabilidade ao processo erosivo são agricultura, silvicultura, pastagem, área urbana, formações pioneiras.

A situação de moderada vulnerabilidade que foi observado nos Plintossolos Pétricos associa-se a sua interação com as rochas do Grupo Itapecuru, declives de 3 a 20%, Planalto Dissecado do Itapecuru e floresta estacional semidecidual submontana. Já no exutório da bacia os condicionantes foram as declividades (8 a 45%), as rochas do Grupo Itapecuru, Formação Codó, Depósitos Aluvionares, Plintossolos Argilúvicos, Planalto Dissecado do Itapecuru e a floresta estacional semidecidual submontana, isto é, uma moderada vulnerabilidade natural.

A UPRH do rio Riachão tem a maior área em situação de vulnerabilidade com cerca de 15,70%. Sendo que ao norte da unidade a vulnerabilidade caracteriza-se como natural envolvendo as formações pioneiras, Lençóis Maranhenses, Neossolos Quartzarênicos, Depósitos Eólicos Continentais Antigos. Já no exutório da bacia as áreas de instabilidade decorrem da presença da vegetação secundária, Plintossolo Argilúvico, Depósitos Aluvionares, Formação Codó, Grupo Itapecuru. Destaca-se que nessa área da bacia o relevo é plano com a presença do Planalto Dissecado do Itapecuru, no entanto, o relevo não proporcionou uma redução da vulnerabilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constata-se que a UPRH do riacho do Gavião apresenta a maior área de estabilidade na bacia com cerca de 67,40%, medianamente estável/vulnerável compreende 24,26% e em situação de vulnerabilidade 8,35%, embora predomine a estabilidade não implica em afirmar que pode continuar desmatando áreas de vegetação nativa para plantio de monoculturas.

Na UPRH do rio Mocambo predominou a estabilidade com cerca de 48,34%, o meio *intergrade* compreende 29,34% e as áreas instáveis 22,33%. Nesta unidade a vulnerabilidade associa-se tanto a interação dos componentes naturais da paisagem ao norte da bacia quanto a atuação antrópica relacionada ao uso urbano, a vegetação secundária e o cultivo de eucalipto. Já os meios estáveis na UPRH do rio Riachão ocupam 43,45%, os *intergrades* cerca de 28,65% e os instáveis 27,9%. Nessa unidade, os usos e formações pioneiras determinaram a vulnerabilidade ambiental, também observa-se a vulnerabilidade natural ao norte da bacia.

Palavras-chave: Rio Preto; Vulnerabilidade Ambiental; Morfodinâmica. Erosão.

REFERÊNCIAS

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.

KLAIS, T. B. A.; DALMAS, F. B.; MORAIS, R. P.; ATIQUÊ, G.; LASTORIA, G.; PARANHOS FILHO, A. C. Vulnerabilidade natural e ambiental do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v.7, n.2, p.277-290, 2012.

PYZDEK, T. Instituto. Folha de cálculo AHP. (2019). Disponível em: <https://www.pyzdekintitute.com/blog/six-sigma/ahp-spreadsheet.html>. Acesso em: 8 fev. 2021.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, New York, v. 15, p. 234-281, 1977.

SILVA, C. A.; NUNES, F. P. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., Natal, **Anais [...]**. São Paulo: INPE, 2009.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977.