

Sistema de suporte a decisão para avaliação do risco de impactos ambientais em bacias hidrográficas por redes de dependência e lógica fuzzy

Margareth Simões Penello Meirelles^{1,2}

Maria do Carmo Dias Bueno³

Thatyana Carla Souza Dias²

Heitor Luiz da Costa Coutinho¹

1 ¹Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico, 1024, Rio de Janeiro - RJ
[_margaret,heitor_@cnps.embrapa.br](mailto:{margaret,heitor}@cnps.embrapa.br)

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ
Pós-Graduação em Engenharia de Computação – Área de Concentração Geomática
Rua São Francisco Xavier, 524 - 5028 D
maggie@eng.uerj.br; thatyc@terra.com.br

³Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Rua Gal. Canabarro 706 – Maracanã, Rio de Janeiro - RJ
mbueno@ibge.gov.br

Abstract. The proposed methodology uses knowledge bases arranged in dependence nets, built with object oriented technology and fuzzy logic chains, to accomplish integrated environmental evaluations. The results can be used to estimate impacts caused to the environment by human practices, and help in the choice of areas with a larger need of investments to improve the environmental quality. They can also be used as a factor, among several others, to support decisions on priority sites to receive investments in environmental recovery.

Palavras Chave. impacto erosivo, redes de dependência, lógica nebulosa, sistema de suporte à decisão, gestão de bacias hidrográficas, erosion impacts, dependence network, fuzzy logic, decision support system, watershed management.

1. Introdução

A degradação das terras é um dos principais problemas ambientais do planeta, além de ser obstáculo ao aumento sustentável da produtividade do agronegócio brasileiro. Os impactos ambientais oriundos da erosão têm reflexos imediatos na qualidade e quantidade de água, essencial para a manutenção da vida, assim como para a capacidade produtiva do agronegócio. A remoção da vegetação nativa nos planaltos para implementação de lavouras e de pastagens, sem considerar a aptidão das terras e sem a adoção de práticas de manejo e técnicas de conservação de solo, além da destruição de *habitats*, acelerou o processo erosivo e o consequente assoreamento no Pantanal. Parte do material oriundo da erosão dos solos na parte alta da bacia são transferidos e depositados na região pantaneira, provocando alterações hidráulicas e hidrológicas na região e, por conseguinte, na paisagem do Pantanal (SIMÕES *et al.*, 2000).

A maior parte dos modelos de avaliação do processo erosivo destina-se a estimar a perda de solos, sem considerar os efeitos da erosão na qualidade e quantidade dos recursos hídricos. A

grande limitação orçamentária dos órgãos de gestão ambiental brasileiros, assim como a baixa capacidade de investimento do setor privado no campo, principalmente em se considerando o reduzido retorno no curto prazo de investimentos em conservação ambiental, faz com que os modelos acima tenham pouca utilidade para direcionar os recursos existentes para mitigação de problemas erosivos.

Este estudo se propõe a fornecer subsídios para o processo de tomada de decisões relativas à mitigação dos impactos erosivos em bacias hidrográficas, através da determinação de áreas prioritárias para investimento e implementação de ações de recuperação e/ou conservação ambiental.

2. Sistemas Espaciais de Apoio a Decisão

Sistemas Espaciais de Apoio à Decisão (SDSS – Spatial Decision Support Systems) combinam a tecnologia de Sistema de informação Geográfica - SIG com modelos matemáticos, de modo que os resultados de várias ações possam ser simulados e comparados com situações existentes, permitindo aos usuários avaliar uma série de questões hipotéticas no gerenciamento de decisões. A avaliação e a comparação de vários cenários possíveis possibilitam ao tomador de decisão encontrar a solução ótima para o problema.

Uma das vantagens desta abordagem é a habilidade de apresentar as informações críticas relacionadas ao problema em questão através de mapas, integrando dados advindos de imagens de sensores remoto, modelos digitais de terreno e diversos mapas temáticos.

2.1. Sistemas Baseados em Conhecimento

Sistemas baseados em conhecimento são programas especiais de computadores que resolvem problemas complexos dentro de um domínio definido, a partir da imitação do processo de pensamento humano, que é baseado em lógica, crença, regras, opinião e experiência (PLANT e STONE, 1991).

Um sistema baseado em conhecimento utiliza a representação do fenômeno, como, por exemplo, uma relação causa e efeito. O conhecimento não é um valor ou conceito preciso, exato, ele pode refletir ao mesmo tempo o quanto se sabe e o quanto não se sabe, sem que ambos sejam complementares. Quanto maior o número de informações com qualidade, mais certo e preciso ele é, continuando, contudo, a expressar um desconhecimento ou incerteza.

O tipo mais comum de Sistema Baseado em Conhecimento é o Sistema Especialista, em que a experiência e o conhecimento dos humanos são capturados sob a forma de regras e fatos que, então, são usados para solucionar problemas. Devido a isso, comumente o termo Sistemas Baseados em Conhecimento diz respeito a sistemas especialistas para predição ou apoio à decisão.

3. Materiais e Métodos

A metodologia proposta desenvolve uma estrutura hierárquica de indicadores, implementada através de redes de dependência e avaliada com o auxílio de lógica nebulosa. O objetivo final dessa modelagem hierárquica é criar um índice geral, capaz de capturar as características-chave do ambiente como um todo, em um único valor.

As etapas para a aplicação da metodologia serão descritas nas seções subseqüentes e baseiam-se em BUENO, 2003; BUENO et al, 2003 e MEIRELLES et al, 2004.

3.1. Seleção da unidade territorial de análise

A região foi dividida em micro-bacias, de modo que cada unidade territorial pudesse ser considerada homogênea. Essa aproximação se faz necessária, pois os dados de entrada (indicadores) são calculados de acordo com a sua preponderância, ou seja, o valor considerado para toda a micro-bacia é o valor atribuído à classe preponderante em termos de extensão. A divisão das micro-bacias foi realizada com a utilização do programa ArcView (www.esri.com) e da extensão *Hydrologic Modeling*. Foi utilizado como dado de entrada um modelo digital de elevação, gerado a partir de curvas de nível a cada 100 metros.

3.2. Seleção dos indicadores

Os indicadores ajudam a determinar as alterações no ambiente, selecionando medidas-chaves, que podem ser físicas, químicas, biológicas ou sócio-econômicas, e que oferecem informações úteis à compreensão do ambiente como um todo.

Os indicadores foram agrupados de acordo com os temas principais: Pressão, Estado e Resposta. Essa divisão é subjetiva e alguns indicadores podem ser relevantes para mais de um tema, conforme ilustra a **Figura 1**.

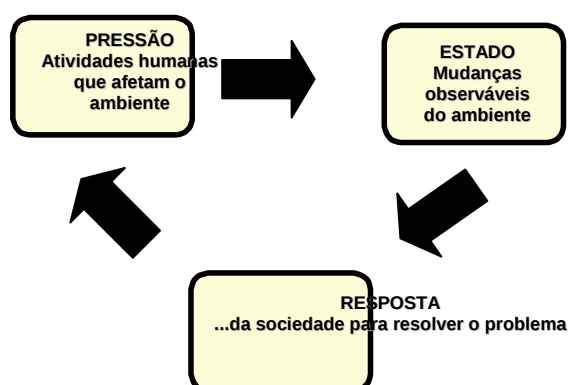


Figura 1 – Definição dos indicadores: Pressão, Estado e Resposta

Indicadores de Pressão, Estado e Resposta, bem como os valores atribuídos a cada um, foram levantados por especialistas através de *workshops* realizados na Embrapa – Solos. O Projeto “SOS Taquari (www.cnps.embrapa.br) – Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Impactos Ambientais de Atividades Agropecuárias na Bacia do Alto Taquari: Instrumento de Gestão Ambiental para os Municípios do Alto Taquari, Pantanal Matogrossense” (Prodetab 093/01-98) motivou o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. Além dos *workshops*, outros encontros também foram realizados no âmbito deste projeto com o objetivo de definir os parâmetros a serem usados em outros estudos que envolvem o Processo Erosivo da região e foram utilizados como base para as discussões com os especialistas.

Os indicadores utilizados para a “Avaliação do Impacto Erosivo” foram : **estado** - mata ciliar, densidade de drenagem, solos, cobertura vegetal, clima; **pressão**: densidade de estradas, conflito de uso; **resposta**: práticas de conservação do solo.

Cada indicador apresentado acima possui seu grau de importância em relação à modelagem do processo erosivo da Bacia do Alto Taquari (BAT), e isto é representado por pesos diferenciados no modelo a ser gerado. Os pesos foram fornecidos em relação a hipótese “Impacto Erosivo é Baixo”. Desta forma, classes e indicadores críticos ao fenômeno erosivo receberam pesos baixos assim como os menos críticos receberam pesos altos.

3.3. Geração dos temas/indicadores por Microbacia

➤ **Mata Ciliar – Indicador de Estado**

Matas ciliares são aquelas que acompanham o curso dos rios, córregos e ribeirões, e também aquelas que se localizam em torno das represas, lagos e nascentes.

As condições do ecossistema ciliar na bacia hidrográfica podem indicar a potencialidade do ambiente em minimizar as consequências da erosão ocorrida nas regiões superiores da bacia. Sob um outro ponto de vista, a caracterização das condições ciliares pode ajudar a identificar quais áreas da bacia que têm mais probabilidade de ter a qualidade da água aprimorada como resultado das condições da vegetação ciliar.

Para o cálculo do indicador “mata ciliar”, considerou-se uma envoltória distante 50 metros dos cursos d’água, onde foi avaliada a quantidade de vegetação existente.

Para a entrada de dados da avaliação deve-se calcular a área total existente nesta envoltória, para cada microbacia hidrográfica, criando-se um *buffer* de 50m dos rios.

➤ **Densidade de Estradas – Indicador de Pressão**

As estradas rurais no Brasil, de maneira geral, são construídas sem observância dos preceitos básicos de conservação e alocação. A ocorrência de estradas mal planejadas e sem conservação (caixas de contenção, etc.), é uma característica da área de estudo. Portanto, as estradas podem ser correlacionadas diretamente com o Impacto Erosivo, já que uma maior quantidade de estradas aumenta as oportunidades para escoamento das águas com uma velocidade maior aumentando, portanto, o aporte de sedimentos aos cursos de água. Esse indicador é calculado através da fórmula: $De = l / Ar$, onde: De = densidade de estradas, l = comprimento total de estradas dentro da unidade territorial (Km), Ar = área da unidade territorial (ha).

➤ **Densidade de Drenagem – Indicador de Estado**

A classificação para este indicador realiza-se com base na premissa de que quanto maior a densidade de drenagem, maior o risco da área sofrer os impactos negativos dos processos erosivos. A densidade de drenagem, relaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia. A relação foi definida por Horton em 1945 e é expressa pela equação: $Dd = Lt / A$, onde: Dd = densidade de drenagem, Lt = comprimento total dos canais e A = área da bacia.

➤ **Solos - Indicador de Estado**

Segundo MMA (1997a) *apud* BUENO et al (2003), a delimitação das classes de solos têm dois grandes objetivos: atender às práticas adequadas de agricultura e pecuária e subsidiar estudos ambientais, que através da integração com outras variáveis, como relevo e cobertura vegetal, possibilitam uma avaliação da fragilidade dos ambientes naturais em face dos processos erosivos e de assoreamento.

Cada unidade de mapeamento de solo do mapa de solos realizado e disponibilizado pelo PCBAP (Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai; MMA, 1997) foi classificada com relação à ocorrência do potencial de erosão. Os maiores valores foram associados às unidades com maior potencial de sofrerem erosão e decrescem à medida que esse potencial diminui. Como dado de entrada na rede de avaliação foi utilizado o valor atribuído à unidade com maior área, em cada microbacia.

➤ **Classe de uso - Indicador de Estado**

A presença da cobertura vegetal original minimiza o risco de impacto erosivo, servindo como uma camada de proteção para o solo contra o impacto da chuva, fonte de matéria orgânica e biomassa que retém umidade e promove a agregação do solo. Além disso, a velocidade de escoamento da água da chuva na superfície do solo é diminuída devido à presença da vegetação, que atua como um obstáculo ao escoamento. A alta biodiversidade das vegetações do Cerrado resulta em grande variedade de sistemas radiculares explorando diferentes profundidades do solo, e levando matéria orgânica e nutrientes a um volume maior do solo através da decomposição de raízes. Por todos estes motivos, um solo com cobertura vegetal nativa oferece maior estabilidade e resiliência à degradação decorrente da erosão, que na Alta bacia do rio Taquari, ocorre muitas vezes de forma espontânea e natural. Cada classe de cobertura/uso do solo mapeada pelo PCBAP (MMA, 1997) foi avaliada com relação ao seu risco de gerar impacto erosivo. Os valores maiores foram atribuídos às classes mais críticas e os menores, às classes menos críticas. Como dado de entrada na rede de avaliação foi utilizado o valor atribuído à classe com maior área em cada microbacia.

➤ **Clima – Indicador de Estado**

Segundo BUENO (2003), o valor da erosividade da chuva é estimado pelo produto da energia cinética total pela intensidade da chuva máxima em trinta minutos. Entretanto, devido à quase total inexistência de dados de intensidade de chuva no Brasil, obtidos através de pluviógrafos, essa metodologia é dificilmente aplicada. A solução é a tentativa de estabelecer o índice de erosividade de chuvas através da correlação entre as quantidades totais de precipitação com a perda de solo: $EI = 6,872 (p^2 / P)^{0,85}$, onde EI é o índice de erosividade da chuva, p = precipitação média mensal (mm) e P = precipitação média anual (mm), quanto maior a erosividade da chuva maior será o Impacto Erosivo.

➤ **Conflito de uso – Indicador de Pressão**

Uma área é considerada como *sem conflito de uso* quando a utilização da terra se dá de acordo com sua capacidade de uso ou aptidão agrícola. Assim sendo, para determinar a existência ou não de conflito confrontou-se o mapa de Aptidão Agrícola das Terras, feito com base nas Unidades Ambientais Naturais, com o mapa de uso e cobertura vegetal.

3.4. Criação das redes de dependência

A proposição básica “O Impacto Erosivo é baixo” tem seu valor obtido pelo resultado da soma das suas redes antecedentes (Estado e Pressão). O mesmo princípio se aplica a cada nível hierárquico da rede, ou seja, a proposição “A Pressão corresponde a um baixo Impacto Erosivo” depende dos valores integrados de seus indicadores. O mesmo acontece com as demais redes do modelo, obedecendo a estrutura hierárquica implementada. O valor do nó AND é calculado pela

soma da média ponderada dos nós ligados a ele, e o valor resultante é propagado para os níveis mais altos da estrutura. A **figura 2** apresenta a estruturação de uma rede de dependência, e a **figura 3** ilustra um exemplo de aplicação de função de pertinência *fuzzy* para o indicador *conflito de uso*.

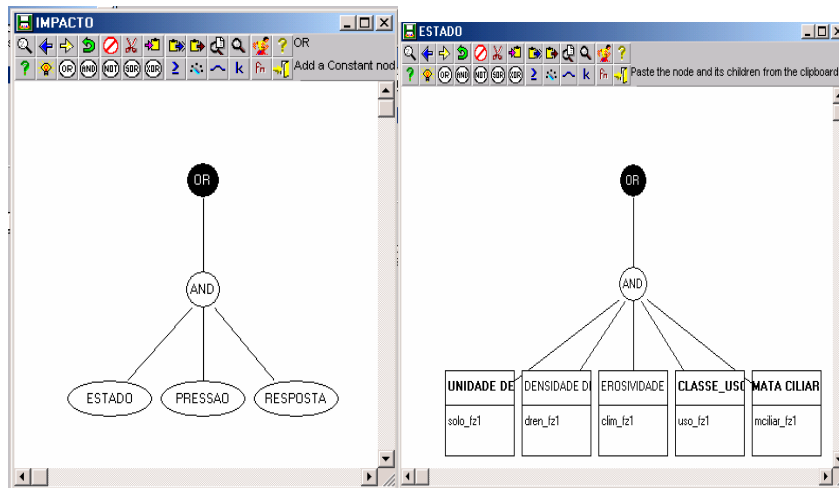


Figura 2 – Montagem das Redes de Dependência

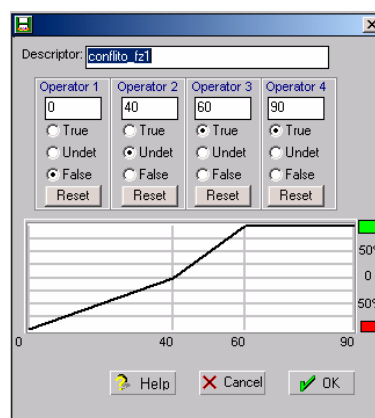


Figura 3 – Exemplo de aplicação de função de pertinência para o indicador conflito de uso

Cada dado de entrada na rede é representado por um argumento do tipo nebuloso ou fuzzy, onde o dado de entrada é comparado a uma função de pertinência que evidencia o grau com que o valor do dado pertence ao conjunto representado pela proposição correspondente.

Os argumentos utilizados para comparação são quantitativos, sendo alguns expressos por valores variando de 1 a 10, enquanto outros variam de acordo com o seu valor de cálculo. No primeiro caso, a classificação foi feita com base em notas estabelecidas pelos especialistas para cada um dos indicadores, tomando como base a premissa de que quanto maior a nota, maior seria a influência no Impacto Erosivo.

3.5. Execução da avaliação

O próximo passo é executar o programa EMDS (Ecosystem Management Decision Support) para obter os resultados da avaliação, o EMDS (REYNOLDS, 1999) está disponível para *download* no site (www.fsl.orst.edu/emds/emdsnews.htm). O programa primeiramente executa funções para validar os dados de entrada e, então processa esses dados, de acordo com a estrutura da rede, levando ao resultado final da avaliação. Os programas utilizados na execução da avaliação foram: Arc View e EMDS (extensão para ArcView) – execução da avaliação.

4. Resultados e Discussão

Os resultados da avaliação mostram que a Bacia do Alto Taquari apresenta um alto grau de Impacto Erosivo, sendo que de um total de 204 micro-bacias, 104 apresentaram resultados próximos da faixa negativa máxima (valores maiores do que -0,90), enquanto apenas 46 micro-bacias apresentaram resultados positivos, ressaltando que esses últimos são valores baixos (entre 0,002 e 0,25), como pode ser visto na Figura 4. Boa parte dos resultados alcançados coincidem com as áreas de maior incidência de processos erosivos críticos, com a presença de enormes voçorocas, ou que tem poucas áreas de vegetação nativa remanescentes e rios desprovidos de matas ciliares, conforme trabalho de checagem de campo realizado. A base de conhecimento poderá ser complementada com informações sobre “conflito de uso”, “topografia”, e ocorrência ou não de “práticas de conservação de solos”, ou qualquer outra disponível no futuro. A vantagem é que o conhecimento foi extraído, e sistematizado numa rede de dependência que poderá ser utilizada a qualquer momento para geração de novas avaliações. Houve um treinamento local (transferência de tecnologia) e a ferramenta já encontra-se disponível aos técnicos e tomadores de decisão para continuidade do trabalho, através da re-alimentação da base de conhecimento através dos dados advindos de monitoramento por satélite.

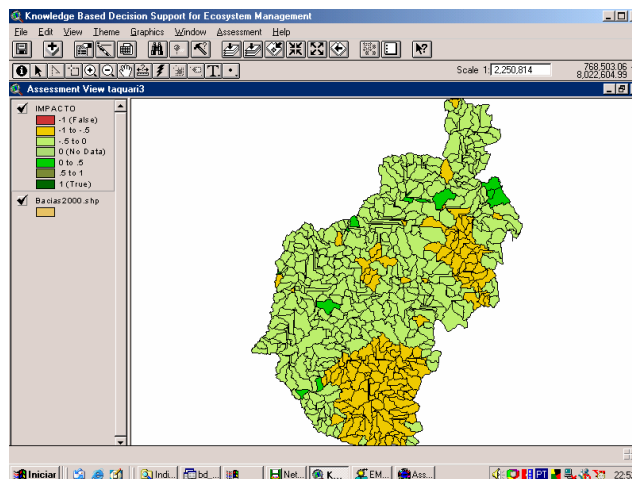


Figura 4 – Resultado da Avaliação

5. Conclusões

A metodologia proposta baseada no ambiente *Ecosystem Management Decision Support* demonstrou ser uma ferramenta apropriada para o desenvolvimento do sistema de suporte a decisão especializado para mitigação de problemas ambientais gerados por processos erosivos em bacias hidrográficas;

Os resultados coincidem com informações de técnicos locais, porém a base de conhecimento será ainda complementada com dados adicionais.

As áreas de maior criticidade concentram-se nas regiões de cabeceiras dos rios que formam a Alta Bacia do rio Taquari.

Técnicos e tomadores de decisão do Mato Grosso do Sul desejam utilizar esta metodologia para realização de novas avaliações (ex: qualidade da água) em outras áreas, escalas e indicadores, o processo de transferência de tecnologia foi um sucesso, o que nos dá um feedback bastante animador em termos de nosso papel científico integrado ao social.

6. Referências Bibliográficas

BUENO, M. C. D., MEIRELLES, M. S. P.; COUTINHO, H. L. C. **Utilização de Redes de Dependência para a Avaliação do Impacto Erosivo da Bacia do Alto Taquari**. In: *IV Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada a Agropecuária e à Agroindústria, 2003*, Porto Seguro - Bahia. CD-ROM, 2003.

BUENO, M. C. D. **Avaliação Ambiental Utilizando Redes de Dependência e Lógica Nebulosa. Dissertação de Mestrado**. FEN/UERJ. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas . Área de Concentração Geomática.116p, 2003.

MMA [Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal]. **Diagnóstico Ambiental da Bacia do Alto Paraguai**. Em: *Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai - PCBAP/Projeto Pantanal*, vol. 2. Programa Nacional de Meio Ambiente, Brasília, 1997b.

MEIRELLES, M.S.P.; DIAS, T.C.S.; BUENO, M.C.D.; COUTINHO, H.L.C. **SAAB - Sistema de Análise Espacial do Risco de Impactos Ambientais Derivados da Erosão em Bacias Hidrográficas**; Embrapa (cd rom), *prelo*.

PLANT, R., STONE, N.D. **Knowledge-based Systems in Agriculture**. McGraw-Hill, Toronto, ON, 1991.

REYNOLDS, K. M. **EMDS Users Guide (version 2.0): Knowledge-Based Decision Support for Ecological Assessment**. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-470, Portland, OR. 63 p., 1999.

SIMÕES, M., COUTINHO, H.L.C., VIEIRA, H.M., MENDONÇA, M.L., CHAUKE, C., LUCENA, G., SANTOS, U.P., RAMALHO, A.F., 2000, "Geotecnologias de Suporte ao Monitoramento e Mitigação de Impactos Ambientais de Atividades Agropecuárias". **GIS Brasil 2000**, Salvador, Agosto, 7 - 11.