

## **Avaliação do potencial à erosão dos solos: uma análise comparativa entre Lógica Fuzzy e o Método USLE.**

Angela Alves<sup>1</sup>  
Flávio Joaquim de Souza<sup>2</sup>  
Marcia Marques<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gisplan Tecnologia da Geoinformação  
Av. Armando Lombardi, 800 sala 311  
Barra da Tijuca – Rio de Janeiro cep:  
angela@gisplan.com.br

<sup>2</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ  
Faculdade de Engenharia – Dept. Engenharia de Sistemas e Computação  
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5015D, Maracanã CEP 20550-900, Rio de Janeiro, RJ.  
fjsouza@eng.uerj.br

<sup>3</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ  
Faculdade de Engenharia – Dept. de Engenharia Sanitária e Ambiental  
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5024E, Maracanã CEP 20550-900, Rio de Janeiro, RJ.  
marciam@uerj.br

**Abstract.** Efforts have been made to develop appropriate methodologies for assessing soil erosion potential where the Universal Soil Loss Equation (USLE) has been the most worldwide used method. The objective of this study is to apply concepts of Fuzzy Logic in a model for assessment of soil erosion potential using a reduced number of variables. The input data to the two-variable Fuzzy model proposed are slope and land cover maps. Both models (two-variables Fuzzy and USLE) were applied in a testing area - the Pimentel basin, Rio de Janeiro State. The results obtained with both models were comparable, regarding the spatial distribution as well as the % of the area in the basin occupied by three classes, among five defined: Moderate, High-Moderate and High. Therefore, the two-variable Fuzzy model succeeded in estimating areas with moderate-to-high erosion potential, using a reduced number of variables. Such feature makes the two-variable Fuzzy model suitable particularly for those regions characterized by limited resources, insufficient information and unsustainable use of soil.

**Keywords:** environmental assessment, fuzzy logic, GIS, soil erosion models, USLE model, diagnóstico ambiental, lógica fuzzy, Sistemas de Informações Geográficas, SIG, modelos de erosão, USLE.

### **1. Introdução**

A erosão acelerada de solos é um problema mundial causador de impactos ambientais e econômicos relevantes e que tem origem tanto em causas naturais quanto em pressões antrópicas. Planos de conservação de solos em áreas de alta erosão necessitam de mapas de risco da ocorrência do fenômeno, que são criados a partir de modelos de erosão. Os principais modelos existentes levam em consideração os fatores envolvidos no processo de erosão, incluindo características climáticas, propriedades dos solos, topografia e práticas de uso dos solos.

No entanto, a maioria desses modelos possui limitações, tais como: (1) necessitam de um grande volume de dados, alguns deles de difícil obtenção; (2) são geralmente desenvolvidos para regiões diferentes daquelas nas quais são aplicados; (3) na maioria das vezes são criados para escalas nas quais diferentes interações e processos podem ser importantes.

Entre os modelos amplamente utilizados está a Equação Universal de Perda dos Solos (Universal Soil Loss Equation USLE), que é o produto dos parâmetros que influenciam o fenômeno da erosão (Wischmeier et al., 1971). Diversos desdobramentos e revisões ocorreram a partir desse modelo, incluindo a sua aplicação em Sistema de Informação Geográfica (SIG). Um fator limitante é que o modelo USLE não considera a interação entre os fatores no processo da erosão, o que o torna limitado para uso universal.

No Brasil, os trabalhos iniciais sobre a equação de perdas de solo foram desenvolvidos por Bertoni (1985), que utilizou os dados existentes para as condições do Estado de São Paulo. A partir de 1975, vários autores vêm tentando avaliar os fatores da equação para outras regiões. No entanto, o modelo USLE exclui os efeitos da interação entre os fatores no processo da erosão, tornando-se, portanto, limitado para uso universal. A aplicação da Lógica Fuzzy para estimar o potencial à erosão dos solos tem sido apresentada como alternativa à USLE (Alves et al., 2002).

No presente trabalho, é proposta uma metodologia para estimar a distribuição espacial de classes de potencial à erosão fazendo-se uso dos conceitos de Lógica Fuzzy em um modelo que se diferencia pelo número reduzido de variáveis, pois utiliza somente duas: os mapas de declividade e de cobertura. Os modelos (USLE e Fuzzy) foram aplicados na área teste microbacia do Rio Pimentel, localizada no Município de São Fidélis, Estado do Rio de Janeiro. Posteriormente, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelos dois métodos. O restante deste artigo compreende os tópicos referentes à (2) Metodologia e área de estudo, (3) Resultados, (4) Discussão e (5) Conclusões e Recomendações.

## **2. Metodologia e área de estudo**

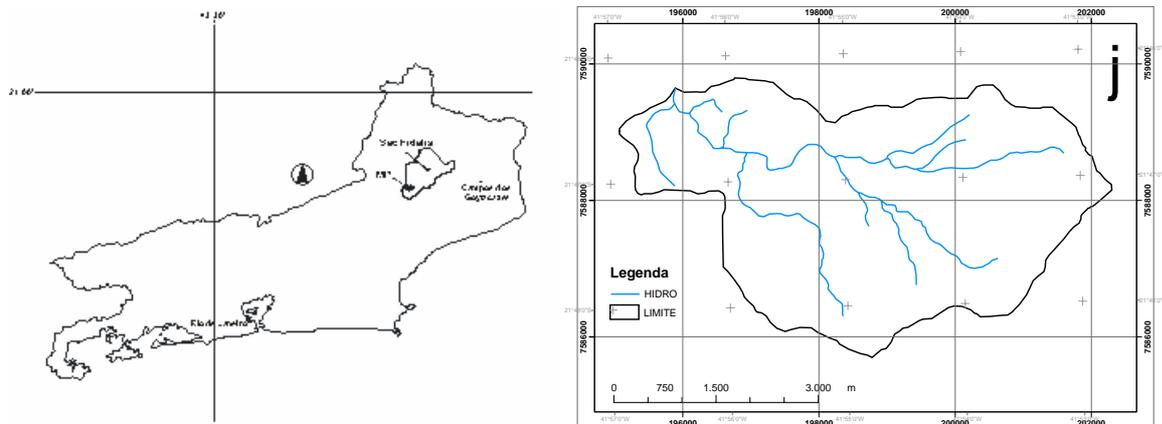
### **2.1 Área de estudo**

Para aplicações dos modelos de avaliação do potencial à erosão, foi utilizada como área de estudo teste a Microbacia do Pimentel (MP), localizada no município de São Fidélis, região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, entre os paralelos 21°46' e 21°48' sul e 41°53' e 41°57' W Gr (**Figura 1**). Abrangendo uma área de aproximadamente 18 km<sup>2</sup>, o uso do solo predominante na MP é de pecuária extensiva. Embora ainda existam pequenos fragmentos florestais, a MP encontra-se praticamente sem a cobertura vegetal original, em decorrência de desmatamentos, monoculturas e pecuária. Os tipos de solos predominantes na MP são solos Glei, Latossolos e Podzólicos.

### **2.2 Metodologia**

Para a realização do presente trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Carta topográfica na escala de 1:50.000, folha Renascença, DSG, MI 2684-3, formato digital vetorial;
- Fotografia aérea, pancromática, em escala 1:30.000, vôo realizado no ano de 2001;
- Mapa de reconhecimento do solo da Bacia do Pimentel – Projeto Zoneamento do Café do Estado do Rio de Janeiro escala 1:50.000 de 2001;
- Totais pluviométricos da Estação São Fidélis.



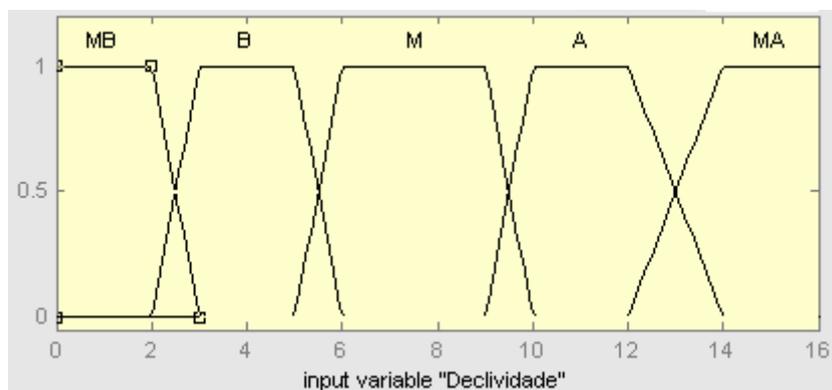
**Figura 1.** Mapa de localização da Bacia do Pimentel, Município de São Fidélis – RJ.

O software utilizado para a implementação da base de dados foi o Arcgis 8.3 e para o georreferenciamento e processamento da fotografia aérea foi o software Envi. A partir da base cartográfica implementada em ambiente SIG, foram derivados os mapas temáticos que representam os fatores do modelo USLE. Tais mapas temáticos são também utilizados para a construção do modelo Fuzzy de duas variáveis.

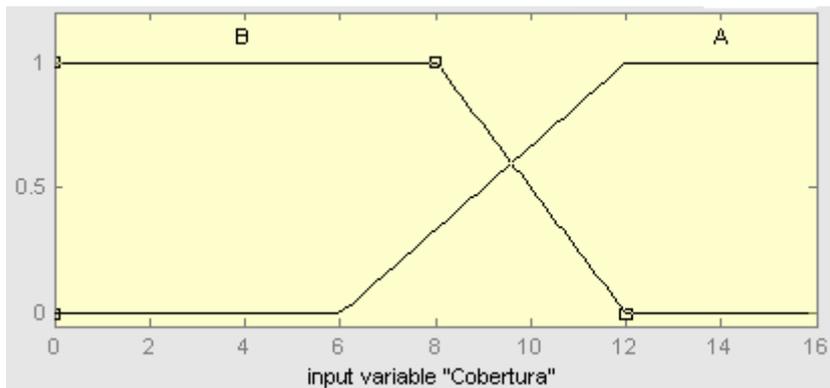
### 2.2.1 Variáveis de entrada e regras fuzzy

As técnicas da lógica Fuzzy são aplicadas para estimar as áreas que possuem potencial à erosão. Os dados de entrada para o modelo de duas variáveis consistem na declividade (em graus) e a cobertura do solo. O mapa de declividade expresso em graus, gerou classes automáticas variando de  $0^\circ$  a  $77^\circ$ , que foram re-classificadas em quinze categorias. O mapa de cobertura foi classificado em três categorias. Para o sistema de inferência, essas categorias serviram de entrada para a determinação dos conjuntos fuzzy.

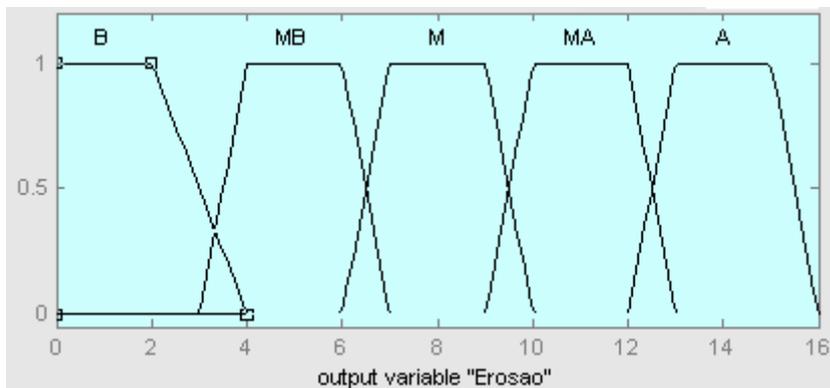
Uma vez definidos os conjuntos fuzzy, foram definidas as funções de pertinência utilizando-se a ferramenta Fuzzy Toolbox do software Matlab. Para alcançar resultados coerentes, foram feitas diversas experiências refinando as funções de pertinência e os conjuntos de regras. As **Figuras 2, 3 e 4** apresentam as funções de pertinência de entrada e saída e a **Tabela 1** o conjunto de regras do modelo, já em seu formato final.



**Figura 2.** Funções de pertinência da variável “Declividade”.



**Figura 3.** Funções de pertinência da Variável “Cobertura”.



**Figura 4.** Funções de pertinência da saída do modelo fuzzy “Erosão”.

**Tabela 1.** Base de regras do modelo de duas variáveis.

	Declividade				
Cobertura	MB	B	MO	AL	MA
BA	Baixo	Moderado	Baixo	Moderado	Moderado Alto
AL	Baixo	Baixo	Moderado Alto	Moderado Alto	Alto

### 2.2.2 Modelo USLE

Para o cálculo do potencial à erosão dos solos utilizando o modelo USLE foi aplicada a equação:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

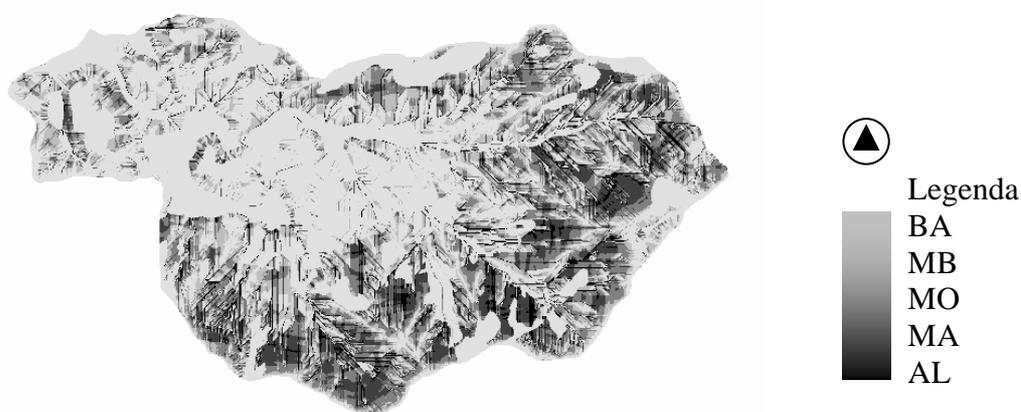
- A = perda de solo,
- R = fator erosividade da chuva,
- K = fator erodibilidade do solo,
- LS = fator topográfico,
- C = fator cobertura e
- P = fator prática conservacionista.

Através dos mapas temáticos de cada fator da USLE, foi feito o produto entre as cinco variáveis da USLE em um SIG.

### 3. Resultados

#### 3.1 Potencial à erosão através da equação USLE

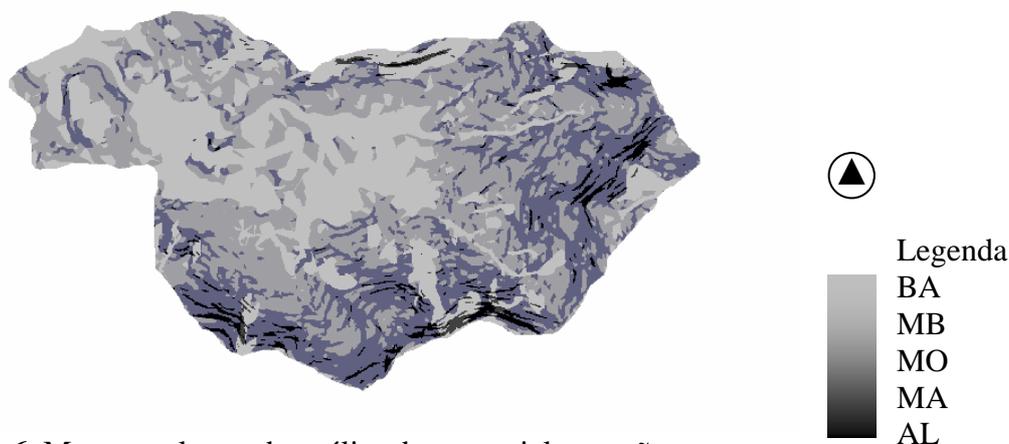
A perda de solo anual calculada pela USLE não inclui a erosão causada pelas estradas. Aproximadamente 52% da área bacia encontra-se com taxa de erosão inferior a 25 ton/ha.ano, estando na categoria “Baixo”; 16% da área bacia encontra-se com perda de solo entre 50 e 100 ton/ha.ano, estando na categoria “Moderado Baixo”; 17% na categoria “Moderado”, 11% na categoria “Moderado Alto” e 4% na categoria “Alto” (**Figura 5**).



**Figura 5.** Mapa resultante da análise do potencial à erosão do modelo USLE.

#### 3.2 Potencial à erosão através do modelo Fuzzy de duas variáveis

O potencial à erosão estimado pelo modelo Fuzzy variou entre as classes “Baixo” e “Alto”. 31% da bacia foi classificada como “Baixo”; 38% como “Moderado Baixo”; 20 % como “Moderado”; 8% “Moderado Alto”; e 1% “Moderado Alto”. A **Figura 6** mostra o resultado da avaliação pelo modelo de duas variáveis entre as cinco categorias de potencial à erosão. As categorias de potencial “Baixo” e “Moderado Baixo” se combinadas, representam 69% da bacia ou aproximadamente 12 km<sup>2</sup> da área da bacia, representando uma semelhança com o resultado obtido com o modelo USLE (**Figura 5**).



**Figura 6.** Mapa resultante da análise do potencial a erosão.

### 3.3. Análise comparativa entre os modelos

Para avaliar a eficiência dos modelos propostos, os resultados obtidos pelos dois modelos USLE e fuzzy foram comparados. Os resultados obtidos tanto com o modelo USLE, quanto com modelo fuzzy, foram divididos em cinco categorias qualitativas de potencial à erosão: “Baixo”, “Moderado Baixo”, “Moderado”, “Moderado Alto” e “Alto” (**Tabela 2**).

**Tabela 2.** Distribuição das categorias de potencial à erosão obtida com os modelos fuzzy duas variáveis e o modelo USLE.

<b>Categorias</b>	<b>Modelo fuzzy de duas variáveis</b>	<b>USLE</b>
Baixo	31%	52%
Moderado Baixo	38%	16%
Moderado	20%	17%
Moderado Alto	7%	11%
Alto	4%	4%

## 4. Discussão

O modelo USLE é uma equação empírica resultante de uma série de avaliações feitas em talhões de solo. Desde a sua introdução em 1950, diversos estudos têm buscado o aperfeiçoamento da equação, incluindo a implementação da equação em Sistemas de Informações Geográficas e o desenvolvimento de novos métodos para a geração do fator topográfico e comprimento de rampa, entre outros. A equação RUSLE (Revised USLE), por exemplo, foi desenvolvida como uma atualização da USLE com o principal objetivo de melhorar a performance da USLE. A RUSLE utiliza os mesmos fatores da USLE, se diferenciando somente na precisão dos valores do fator erosividade das chuvas e do fator K, que utiliza como parâmetro para seu cálculo a umidade dos solos. Informações sobre o modelo RUSLE podem ser obtidas em Renard et al. (1994).

Um problema encontrado em tal modelo empírico é que embora sua estrutura seja construída a partir de um formato simples e fácil de aplicar, a performance do mesmo é limitada em termos de descrever adequadamente o relacionamento da perda de solos com os fatores que fazem parte do fenômeno. A aplicação dos conceitos da lógica fuzzy, assim como

a investigação detalhada do relacionamento entre as classes das variáveis que compõem a USLE, representa uma busca por aprimoramento da USLE com o objetivo de alcançar resultados mais próximos ao mundo real.

Com relação à aplicação da lógica fuzzy no estudo de caso em questão, provavelmente por se tratar de uma microbacia, apenas três classes de cada uma das variáveis “cobertura” e “FK” foram identificadas. Como resultado, a divisão em categorias fuzzy dessas variáveis não constituiu-se em tarefa difícil, e para tanto, foi levado em consideração o maior ou menor potencial à erosão de cada classe dessas variáveis.

Ainda com relação à variável “cobertura”, um trabalho de campo minucioso é necessário para identificar as diferentes sub-classes de cobertura do solo, tais como os diferentes tipos de cultivos e de floresta. Isto poderá permitir uma maior sensibilidade dos modelos com relação à cobertura do solo na área de estudo.

A correspondência entre as classes das variáveis no modelo fuzzy de duas variáveis foi intuitiva e baseada no conhecimento de especialista (modelador). Não foi encontrada na literatura nenhuma correspondência entre as classes das variáveis da USLE. Para um aprimoramento do modelo de duas variáveis, é necessária uma melhor avaliação da interação entre as mesmas.

A aplicação dos modelos fuzzy em bacias de maior escala, nas quais é provável a presença de um número maior de classes, poderá fornecer uma melhor classificação dos valores nas quinze categorias fuzzy para a entrada no sistema de inferência. Entretanto, é importante enfatizar que a erosão gera problemas relevantes, tanto ambientais quanto econômicos em também em escala reduzida como microbacias.

As funções de pertinência foram definidas de acordo com Mitra et al. (1998). Para alcançar o resultado final, foram realizadas várias experiências utilizando diferentes ajustes das funções de pertinência e diferentes regras, visando uma maior coerência com o modelo USLE.

## **5. Conclusões e recomendações**

Em termos de distribuição espacial, os resultados obtidos através do modelo fuzzy foram comparáveis aos resultados obtidos com o modelo USLE (Alves, 2004) no tocante às classes de moderado a alto potencial à erosão. A correspondência apresentada entre o modelo de duas variáveis com o modelo USLE significa que o mapa resultante do modelo fuzzy pode vir a ser utilizado para otimizar visitas ao campo e intervenções quanto ao manejo, uso e cobertura do solo. Entretanto, para validação dos resultados obtidos, o trabalho de campo é imprescindível.

Em termos de distribuição espacial, os resultados obtidos com os modelos fuzzy de duas variáveis foram muito similares aos obtidos com o modelo USLE particularmente quanto às classes de moderado a alto potencial, sendo que as duas variáveis de entrada do modelo Fuzzy são mais facilmente adquiridos do que as cinco variáveis de entrada da USLE.

Embora existam trabalhos publicados sobre a aplicação da lógica fuzzy em estudos ambientais, ainda são poucos os que abordam modelos de erosão. O presente trabalho é uma contribuição para o tema, uma vez que propõe e analisa o uso de ferramentas e procedimentos em modelagem de dados ambientais e modelagem computacional para estudos de erosão. Além disso, o modelo fuzzy de duas variáveis possibilita a estimativa do potencial à erosão em situações onde haja pouca disponibilidade de dados sobre a região de estudo e escassez de recursos.

O presente trabalho não esgota o potencial da utilização do número reduzido de variáveis e de aplicação da lógica fuzzy na modelagem do potencial à erosão. Propõem-se, portanto, a continuação dos estudos para aperfeiçoamento do modelo envolvendo os seguintes temas:

- Pesquisar as relações entre as variáveis antrópicas, físicas e ambientais do modelo fuzzy;
- Pesquisar a influência da alteração da base de regras e funções de pertinência na modelagem do potencial à erosão;
- Investigar a aplicação do fator LS juntamente com a variável cobertura no modelo de duas variáveis.

## Referências

Alves, A. **Uma Análise do Potencial à Erosão dos Solos com o uso de Lógica Fuzzy e Sistemas de Informações Geográficas**. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação - Geomática) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, 2004.

Alves, A., Marques, M., Souza, F.J. Análise do potencial erosivo dos solos em bacias hidrográficas: Aplicação da Lógica Nebulosa (Fuzzy) no diagnóstico ambiental. **Pesquisa Agropecuária e Desenvolvimento Sustentável**, PESAGRO-RIO, v. 1, n. 1, p.1-13, 2002.

Bertoni, J., Lombardi Neto, F. **Conservação do Solo**. São Paulo: Livrocetes, 1985. 392p.

Mitra, B., Scott, D., Dixon, C., McKimney, J. Application of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed. **Geoderma**, v. 86, n. 4, p.183-209, 1998.

Renard, K.G., Foster, G.R., Yoder, D.C., McCOOL, D.K. RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 49, n. 3, p.213– 220, 1994.

Zadeh, L. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

Wischmeier, W., Johnson, C., Cross, B. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil Water Conservation**, v. 26, n. 2, p.189-193. 1971.