

Estimativa da suscetibilidade potencial à erosão laminar devido a fatores naturais: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Porto Alegre (RS)

**Antônio Luís Schifino Valente¹, Jair Carlos Koppe², Alfonso Risso³,
Cezar Augusto Bastos⁴, Adelir José Striedler² & Regina Davison Dias⁵**

¹*Departamento de Matemática - FURG, Rio Grande, RS*

²*Laboratório de Pesquisas Minerais - UFRGS, Porto Alegre, RS*

³*Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS, Porto Alegre, RS*

⁴*Departamento de Materiais e Construção - FURG, Rio Grande, RS*

⁵*Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC*

RESUMO: Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para estimativa, por meio de técnicas de geoprocessamento, da suscetibilidade potencial à erosão laminar devido a fatores naturais. O método utiliza a integração de dados referentes a aspectos naturais do meio físico, considerados na Equação Universal de Perdas dos Solos. Por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), em especial, o *software* IDRISI, são cruzadas informações sobre erosividade da chuva, erodibilidade do solo e fator topográfico. Para a determinação do fator topográfico são utilizadas técnicas de modelagem digital do terreno e o método proposto por Risso & Chevallier [13]. Como resultado é apresentado o mapa da suscetibilidade potencial à erosão laminar devido a fatores naturais, na escala 1:50.000, para o município de Porto Alegre (RS).

1. INTRODUÇÃO

As técnicas atualmente disponíveis de geoprocessamento por meio de equipamentos de informática têm constituído ferramentas poderosas, rápidas e eficientes para o estudo do meio físico. O uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), em especial, tem permitido a agilização de processos demorados e exaustivos utilizados para o cruzamento manual de mapas sobre o meio físico e para manipulação de um grande número de informações de interesse da Engenharia. A determinação da suscetibilidade potencial à erosão laminar, por exemplo, envolve normalmente a combinação de dados distribuídos no espaço sobre clima, topografia e tipo de solo, muitas vezes realizada por processos manuais.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para estimativa, por meio de técnicas de geoprocessamento, da suscetibilidade potencial à erosão laminar devido a fatores naturais. Os procedimentos descritos constituem parte da metodologia desenvolvida por Valente [15] para a integração de dados, no computador, visando a elaboração de mapas geotécnicos, a análise do

meio físico e suas interações com a mancha urbana.

A área de estudo é o município de Porto Alegre, situado na porção Leste do estado do Rio Grande do Sul, à margem esquerda do Lago Guaíba. A região é formada pelo Escudo Cristalino Sul-Riograndense e por uma planície costeira interna, constituindo um relevo forte de morros, coxilhas e terras baixas, com planícies aluviais, terraços fluviais e lacustres, banhados e ilhas fluviais.

2. PROPOSTA METODOLÓGICA E SUA APLICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE (RS)

2.1. Etapa 1: seleção do material e delimitação da área de estudo

Nessa etapa é realizada a seleção do material necessário à aquisição de dados georreferenciados sobre o meio físico da área de estudo.

Para o município de Porto Alegre foi selecionado o seguinte material:

- carta topográfica, na escala 1:50.000, ano de 1977, da Divisão de Serviço Geográfico do Exército (DSG) Folhas, São Leopoldo, Porto Alegre, Itapuã, Guaíba e Morretes;

- levantamento aerofotogramétrico da Região Metropolitana da Grande Porto Alegre, escala 1:10.000, ano 1972;

- mapa pedológico, escala 1:25.000, referente às unidades de solos residuais oriundos dos granitos, adaptado de Bastos [3];

- mapa do município de Porto Alegre (RS), em escala 1:15.000, ano 1995.

A etapa 1 envolve ainda a delimitação da área de estudo. No caso do município de Porto Alegre foram demarcadas as áreas emersas sobre a carta topográfica, escala 1:50.000, ano 1977, escolhida como base cartográfica para o estudo. As informações sobre o limite do município foram extraídas do mapa do município de Porto Alegre (RS), escala 1:15.000, ano de 1995.

2.2. Etapa 2: mapeamento das unidades de solos

Considerando que a grande maioria dos municípios brasileiros ainda carecem de informações pedológicas mais detalhadas e que nas áreas urbanas, principalmente, os mapas sobre o meio físico são praticamente inexistentes, torna-se necessário muitas vezes, nessa fase da metodologia, a elaboração de um mapa com as unidades de solos, conforme destaca Davison Dias [8]. Nesses casos, pode ser necessário a realização de um estudo pedológico direcionado à Geotecnia a partir de mapas topográficos, geomorfológicos, fotografias aéreas e minucioso trabalho de campo.

Para o município de Porto Alegre (RS) o mapa das unidades de solos para fins geotécnicos (Figura 1), na escala 1:50.000, resultou da atualização do mapa de solos residuais oriundos dos granitos Bastos [3] e do mapeamento das unidades de solos hidromórficos. Para isso, foi realizado um estudo pedológico simplificado de acordo com Davison Dias [7,8] e empregada a técnica de fotointerpretação segundo Koffler [12] a partir de fotografias aéreas, pancromáticas, escala 1:40.000. As unidades de solos (Tabela 1) foram identificadas conforme o sistema de classificação pedológica proposto por Camargo *et al.* [5]. Na definição de cada unidade predominou o tipo de solo ou classe taxonômica dominante na área.

Foram mapeadas também unidades conhecidas como associação de solos conforme Curi *et al.* [6]. Uma descrição detalhada das características físicas de cada unidade de solo no município de Porto Alegre pode ser encontrada em Valente [15].

Tabela 1 - Unidades de solos - Porto Alegre/RS

Sigla	Descrição
PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
R/PV	Associação de Solos Litólicos e Podzólico Vermelho-Amarelo
R	Solos Litólicos
PL/PV	Associação de Planossolo e Podzólico Vermelho-Amarelo
PL	Planossolo
A/HG	Associação de Solos Aluviais e Glei Húmico
A	Solos Aluviais
HO	Solos Orgânicos
AT	Aterros

2.3. Etapa 3: conversão dos dados para o formato digital

O método empregado para a conversão dos dados espaciais para o formato digital é a digitalização manual de mapas, procedida por meio de um sistema CAD (Computer Aided Design). Por esse processo, as feições geográficas existentes nos mapas gráficos são armazenadas em arquivos digitais à medida em que seus pontos são percorridos com um cursor sobre uma mesa digitalizadora, calibrada por meio de pontos de controle. Dessa forma, são construídos, no AutoCAD, inúmeros *layers* referentes ao mapa das unidades de solos, às informações topográficas, à rede de drenagem e ao limite da área de estudo.

Para o município de Porto Alegre (RS), as informações topográficas foram armazenadas em duas fases distintas com a finalidade de capturar um maior número de dados sobre o relevo e, conseqüentemente, a posterior geração de um modelo digital do terreno (MDT) mais preciso. Na fase 1 foram armazenados as curvas de níveis com equidistância de 20 metros e os pontos cotados em cumes, vales e planícies a partir das cartas topográficas, na escala 1:50.000, ano de 1977, da Divisão de Serviço Geográfico do Exército, já especificadas no item 2.1. Na fase 2, nas áreas de menor declividade onde são praticamente raras as informações sobre a topografia na escala 1:50.000, foram digitalizados novos pontos cotados a partir

do levantamento aerofotogramétrico, escala 1:10.000, da Secretaria Municipal de Planejamento.

2.4. Etapa 4: implementação de técnicas de modelagem digital do terreno

Essa etapa tem por finalidade a geração, no computador, de um modelo representativo do terreno da área de estudo, visando determinação do comprimento das vertentes para o cálculo da suscetibilidade potencial à erosão potencial.

Na implementação do MDT é utilizado o modelo de pontos de acordo com Burrough [4], que permite a descrição e a análise do terreno em um ambiente computacional por meio da geração de uma grade regular retangular ou *grid* [Aronolf, 2]. Já o processo de interpolação empregado para gerar os valores de altitude nos nós da grade regular é a triangulação com interpolação linear, implementada no programa SURFER for Windows. Trata-se, portanto, de um processo de interpolação de ajuste local na medida que considera apenas os dados localizados na vizinhança do ponto a ser interpolado. É um processo recomendado para o estudo de fenômenos como altimetria que apresenta pequeno intervalo de variação e conseqüentemente um número elevado de pontos amostrais.

Para o município de Porto Alegre (RS), a geração da grade regular a partir das informações topográficas capturadas no AutoCAD foi executada para uma resolução inicial de 60x60 metros. Posteriormente, o arquivo *grid* teve alguns valores de altitude corrigidos, conforme comenta Heller & Weibel [10], em especial, na periferia da grade regular.

2.5. Etapa 5: geração dos planos de informações originais no SIG

Nesta etapa, as informações espacialmente distribuídas e já no formato digital, são armazenadas no software IDRISI, um sistema destinado ao processamento de imagens e informações geográficas desenvolvido pela Graduate School of Geography, Clark University, originando Planos de Informação (PIs). Esses Planos de Informações (Tabela 2), contém de forma georreferenciada todos os dados sobre um

determinado tema e são denominados de Originais, pois resultam diretamente das cartas e dos mapas selecionados na Etapa 1 ou do *grid* gerado na Etapa 4 da metodologia. Em seguida, é elaborado o modelo cartográfico [Aronoff, 2] para a obtenção do Plano de Informação EROSÃO, a partir dos PIs Originais. A figura 2 mostra o plano de informação correspondente ao modelo digital do terreno sombreado para o município de Porto Alegre.

Tabela 2 - Planos de informações originais

Plano de Informação (PI)	Sigla
Limite da área de estudo	PI-LIM
Modelo digital do terreno	PI-MDT
Máscara	PI-MASCARA
Unidades de solos	PI-SOLOS
Rede de drenagem	PI-DREN

2.6. Etapa 6: determinação do fator topográfico

O fator topográfico (LS) é um dos aspectos do meio físico considerado na Equação Universal de Perdas dos Solos, proposta por Wischmeier & Smith [16]. De acordo com Ferrari *et al.* [9], o fator topográfico sintetiza a energia do relevo, representada pela declividade e pelo comprimento de rampa e exerce forte influência na erosão dos solos, pois afeta a velocidade e o volume de escoamento superficial.

Tradicionalmente, a determinação do fator topográfico (LS) envolve a elaboração manual de mapas de isovalores de declividades e comprimentos de rampa. Trata-se de um procedimento demorado, que utiliza medidas obtidas por meio de gabaritos a partir de mapas topográficos. Por isso, a presente metodologia utiliza para a sua determinação o método automático proposto por Risso & Chevallier [13].

Por esse processo, os parâmetros L (comprimento de vertente ou de rampa) e S (declividade de vertente) são obtidos no computador a partir do modelo digital do terreno (MDT) gerado na etapa 2.4. A estimativa da declividade média (S) e do comprimento médio da vertente (L) é calculado a partir da matriz de orientações de fluxo [Jenson *et al.*,11]. O início das vertentes é caracterizado por todas as células que não apresentam nenhum vizinho orientado em sua direção, isso é, que possuam fluxo acumulado

igual a zero. Os cálculos da declividade, do comprimento da vertente a montante e, posteriormente, do fator topográfico (LS) são determinados para cada célula, seguindo o caminho dado pela orientação de cada elemento da imagem. Uma descrição detalhada desse método encontramos em Risso & Chevallier [13].

Para o município de Porto Alegre (RS), o plano de informação correspondente ao fator LS (PI-LS), figura 3, foi determinado a partir do PI-MDT, cuja resolução foi anteriormente refinada para 30x30 metros com a finalidade de permitir o seu cruzamento posterior com outros planos de informações existentes. A imagem resultante sofreu em seguida um mascaramento por meio do PI-MÁSCARA. Quanto maior o valor de LS, maior a energia potencial do relevo e, conseqüentemente, maior a contribuição da topografia para a suscetibilidade à erosão laminar. Os valores de LS entre 0 e 2 são considerados nulos; entre 2 e 5, baixos; entre 5 e 6, médios e maiores do que 6, altos.

2.7. Etapa 7: mapeamento da erodibilidade dos solos

A erodibilidade dos solos (K) é o resultado de suas características morfológicas, físicas, químicas, biológicas e mineralógicas como textura, estrutura, gradiente textural, espessura e permeabilidade, indicando a sua maior ou menor suscetibilidade à erosão. De acordo com Salomão[14], a textura influi no potencial das enxurradas e na remoção das partículas de solo, pois age na capacidade de infiltração e absorção da água da chuva e na coesão do solo; a estrutura age na capacidade de infiltração e absorção das águas pluviais e na capacidade de remoção das partículas do solo; o gradiente textural e a espessura do solo, influenciam na capacidade de infiltração e no fluxo das águas superficiais e subsuperficiais, enquanto fatores como permeabilidade, densidade e porosidade implicam na maior ou menor capacidade de infiltração das águas de chuva.

Para o município de Porto Alegre (RS), o plano de informação erodibilidade dos solos (PI-ERODIB), um plano de informação derivado, foi gerado, no IDRISI, pela aplicação dos valores de índices relativos de erodibilidade dos solos (Tabela 3) ao PI-SOLOS.

Tabela 3 - Índices relativos de erodibilidade dos solos [adaptado de Salomão, 14]

Unidade de solo	Índice relativo de erodibilidade (t.ha.h/ha.MJ.mm)	Classe de Erodibilidade
R	0,54	Alta
R/PV	0.48	alta/moderada
PV	0,43	moderada
PL/PV	0.21	baixa/moderada
PL,A,HO, HG	0,10	baixa

2.8. Etapa 8: determinação da suscetibilidade potencial à erosão laminar

Para a determinação da suscetibilidade potencial à erosão laminar (PI-EROSÃO) são considerados os fatores naturais apresentados na Equação Universal de Perdas dos Solos (USLE - *Universal Soil Loss Equation*), equação 1, desenvolvida por Wischmeier & Smith [16].

$$A = R.K.LS.C P \quad (1)$$

onde:

A = perda do solo em unidade de massa por unidade de área (t/ha/ano);

R = fator referente à erosividade da chuva (escoamento superficial);

K = fator erodibilidade do solo;

LS = fator topográfico;

C = fator de uso e manejo;

P = fator de práticas conservacionistas.

Os fatores naturais considerados são, portanto, a erosividade da chuva (R), a erodibilidade do solo (K) e o fator topográfico (LS), esse último determinado a partir do comprimento de rampa (L) e do grau de declividade da encosta (S) conforme descrito no item 2.6. Os fatores ligados à ação antrópica como o tipo de cultivo e as práticas conservacionistas não são considerados na determinação do mapa de perdas do solo segundo fatores naturais [Ferrari *et al.*, 9], simplificando a equação da USLE para:

$$Ap = R. K. LS \quad (2)$$

A erosividade da chuva (R), que traduz o potencial de erosão causada pelo impacto das gotas d'água, escoamento superficial e subsuperficial [Salomão, 14], pode ser obtida a partir da interpolação dos valores de erosividade média

anual, para um período aproximado de 20 anos e para diversos locais que dispõem de postos pluviométricos.

Para o município de Porto Alegre (RS), o índice de erosão médio anual foi estimado por Valente [15] a partir dos dados de precipitação de 1979 a 1997. Como esses dados existiam apenas em um posto pluviométrico, a erosividade da chuva não resultou de um processo de interpolação, mas da adoção de $R=553,68 \text{ MJ.mm/ha/h/ano}$ para toda a área de estudo. Logo, a equação da USLE, considerando apenas os fatores naturais e sem a cobertura do solo, pode ser escrita de acordo com a equação (3) e implementada num Sistema de Informações Geográficas (SIG).

$$Ap = 553,68.K.LS \quad (3)$$

Dessa forma, foi gerada uma imagem temporária para o cálculo da erosão que resultou da multiplicação das imagens dos PI-LS (Etapa 6) e PI-ERODIB (Etapa 7). Essa imagem foi depois multiplicada pelo valor numérico representativo da erosividade da chuva. Em seguida, a imagem resultante sofreu um processo de filtragem espacial pela aplicação de um filtro modal, visando a eliminação de alguns ruídos remanescentes. Finalmente, a imagem passou por um processo de reclassificação em função dos graus de erosão mostrados na tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos graus de erosão hídrica (FAO, PNUMA e UNESCO, 1981), apud Alonso *et al.* [1]

Perda do solo (t/ha/ano)	Grau de erosão
< 10	Baixa
10 - 50	Moderada
50 - 200	Alta
>200	Muito alta

3. RESULTADOS

A figura 4 apresenta o mapa da suscetibilidade potencial à erosão laminar (PI-EROSÃO) devido a fatores naturais para o município de Porto Alegre (RS). Os resultados demonstram que 43% da área do município é suscetível a processos de erosão laminar muito alta (acima de 200 t/ha/ano) e 7% a processos de erosão potencial laminar alta (50 a

200 t/ha/ano). Essas regiões com maiores graus de erosão estão localizadas junto às litologias graníticas, onde predominam perfis litólicos (R) e podzólicos vermelho-amarelo (PV), suscetíveis a maior erodibilidade, e onde o relevo determina um fator topográfico elevado, devido ao comprimento das vertentes e aos valores mais acentuados de declividades.

As áreas suscetíveis à erosão laminar moderada (10 a 50 t/ha/ano) situam-se também em regiões de litologias graníticas com solos do tipo litólicos (R), podzólicos vermelho-amarelo (PV) e planossolos (PL), mas onde o relevo, praticamente plano, pouco contribui para a formação de processos erosivos. Elas totalizam 18% da área total do município.

Finalmente, as áreas com suscetibilidade baixa (<10t/ha/ano), perfazem um total 32% do município de Porto Alegre. Encontram-se especialmente nas zonas norte e sul do município, onde são encontrados solos aluviais, glei húmicos e orgânicos e o relevo é plano.

4. CONCLUSÕES

O uso de técnicas de geoprocessamento digital agilizou os procedimentos para a estimativa da suscetibilidade potencial a erosão laminar devido a fatores naturais. Indubitavelmente, é uma tecnologia imprescindível para todas as atividades que se utilizam de mapas e variáveis distribuídas no espaço, como a Geotecnia. O AutoCad, utilizado para a conversão das informações para o formato digital, tratando-se de um programa amplamente conhecido e utilizado na Engenharia, facilitou a digitalização e edição dos dados. Por outro lado, o emprego do software IDRISI, viabilizou a implantação do sistema de geoprocessamento a um custo reduzido. Ambos os programas mostram-se ferramentas eficientes quando usado de forma integrada para a estimativa da erosão laminar. Cabe destacar também a agilidade proporcionada na determinação do fator topográfico, no computador, por meio do método apresentado por Risso & Chevallier [13] a partir do modelo digital do terreno. Recomenda-se que sejam acrescidos à metodologia proposta novos procedimentos e etapas para a implementação dos demais fatores ligados à cobertura do solo e previstos na Equação Universal de Perdas dos Solos.

REFERÊNCIAS

1. Alonso, J. A. *et al.* - *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Madrid, Espanha, 1994.
2. Arnoff, S. - *Geographic information systems: a management perspective*. Canada: WDL Publications, 1991.
3. Bastos, C. A. B. - *Caracterização geotécnica dos solos oriundos de rochas graníticas no município de Porto Alegre*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1991.
4. Burrough, P. A. - *Principles of geographical information systems for land resources assesment*. London: Claredon Press, 1986.
5. Camargo, M.N., Klamt, E. Kauffman, J. H. - *Classificação dos solos usados em levantamentos pedológico no Brasil*. Bol. Inf. Soc. Bras. Ciência dos Solos. Campinas, 12(1), p. 11-33, 1987.
6. Curi, N. *et al.* - *Vocabulário de ciência do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, SP, 1993.
7. Davison Dias, R. - *Metodologia de estudo do comportamento geotécnico dos solos do Rio Grande do Sul visando a cartografia*. In: Colóquio de Solos Tropicais e Subtropicais e suas Aplicações em Engenharia Civil, Anais, Porto Alegre, p.228-247, 1989.
8. Davison Dias, R. - *Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais*. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v.especial, p.51-55, 1995.
9. Ferrari J. A. *et al.* - *Mapeamento da suscetibilidade à erosão na bacia do rio Quilombo-SP*. Instituto Geológico/SMA. São Paulo, Boletim n.12, 1996.
10. Heller, M.; Weibel, R. *Digital terrain Modelling* In: *Geographical Information Systems. Principles and Applications*.v.1, 3 ed. p. 269-297. Maguire, D. J.; Goodchild M.F.; Rhind, D. W., 1991.
11. Jenson, S.; Domingue, J.O. - *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. v. 54, n.11, p. 1593-1600, 1988.
12. Koffer, N. F. - *Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao mapeamento de solos*. Geografia, Rio Claro, n.18 (2), p. 1-51, 1993.
13. Risso, A.; Chevallier, P.- *Uso de um modelo numérico do terreno para a obtenção dos parâmetros topográficos da equação universal de perda de solo modificada*. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 9 e Simpósio Luso Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, 5., Anais. Rio de Janeiro, ABRH/APRH, p.487-496, 1991.
14. Salomão, F.X.T. - *Erosão e a ocupação rural e urbana*. *Curso de Geologia de Engenharia Aplicada a Problemas Ambientais*. IPT. São Paulo, 1992.
15. Valente, A.L.S. - *Integração de dados por meio de geoprocessamento para a elaboração de mapas geotécnicos, análise do meio físico e suas interações com a mancha urbana*. Tese de doutorado, Escola de Engenharia, UFRGS, 1999.
16. Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. *Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning*. *Int. Assoc. Scient. Hydrol*, n. 59, p. 148-159, 1962.

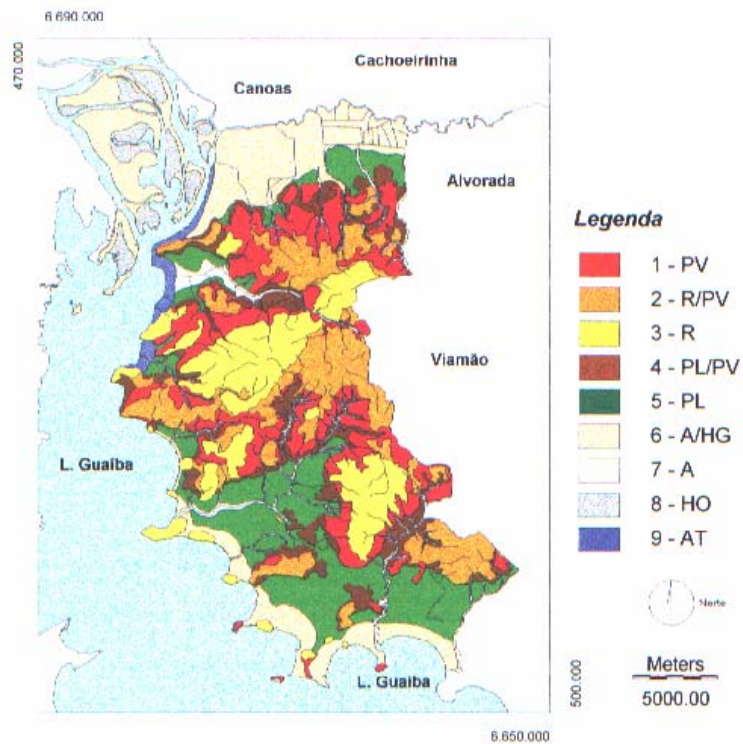


Fig. 1- Mapa das unidades de solos do município de Porto Alegre (RS) para fins geotécnicos com a sobreposição da rede de drenagem.

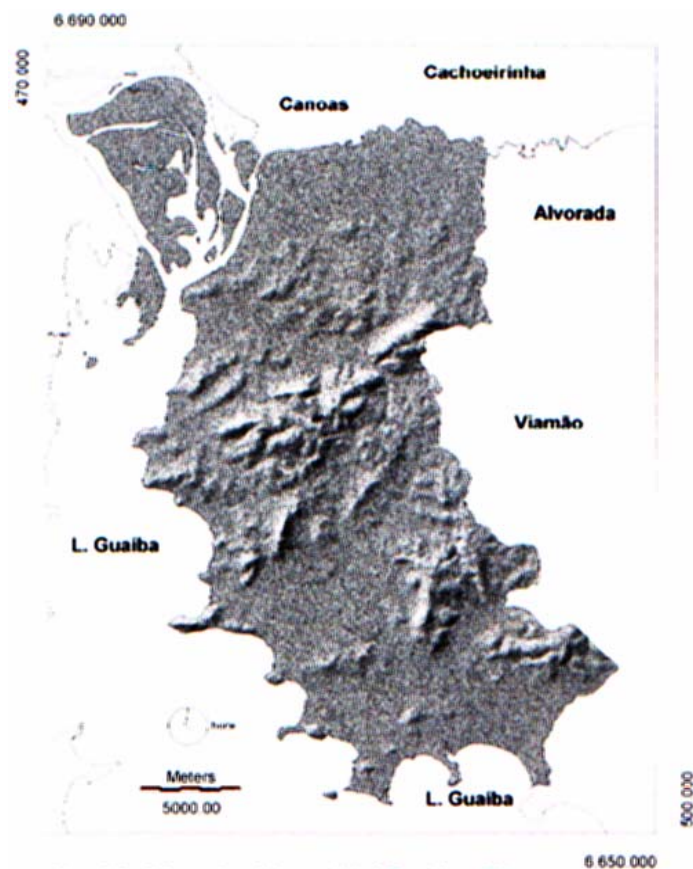


Fig.2 - Modelo digital do terreno para o município de Porto Alegre (RS).

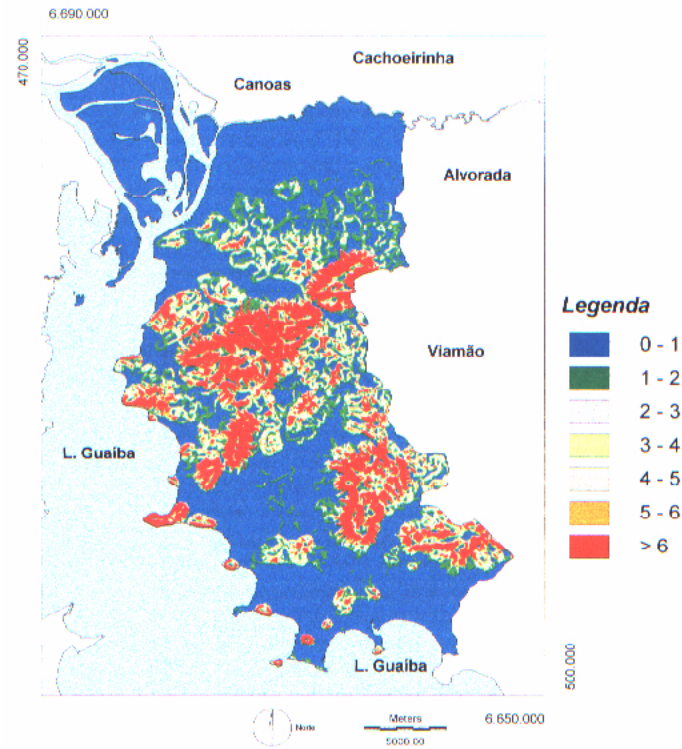


Fig. 3 - PI-LS com a imagem relativa ao fator topográfico.

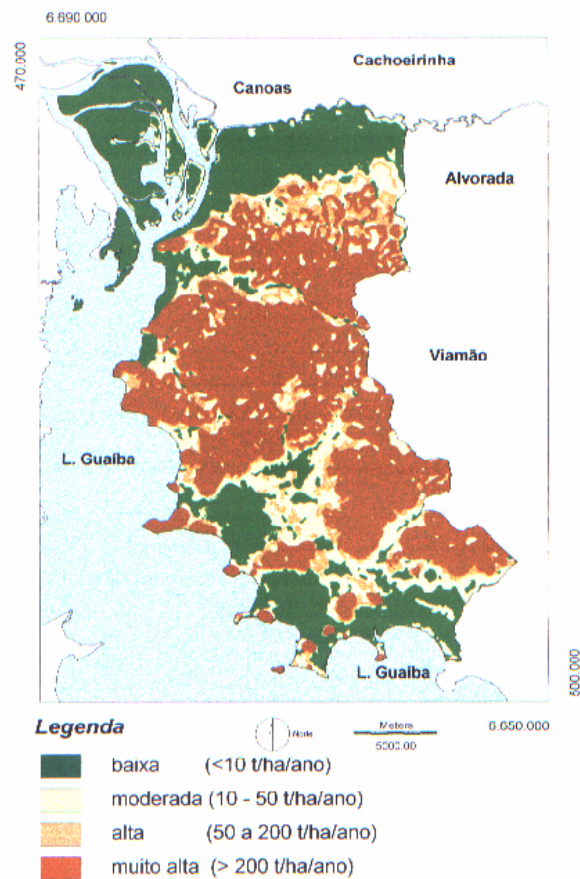


Fig. 4 - PI-EROSÃO, com o mapeamento da suscetibilidade potencial à erosão laminar para o município de Porto Alegre (RS), devido a fatores naturais e desconsiderada a cobertura do solo.