

## ESTIMATIVA DA EROSÃO ATUAL DA BACIA DO RIO PARACATU (MG / GO / DF)<sup>1</sup>

Valtercides Cavalcante da Silva<sup>2</sup>

### ABSTRACT

ESTIMATE OF THE ACTUAL EROSION OF THE  
PARACATU RIVER BASIN, BRAZIL

The universal soil loss equation (USLE) is widely used all over the world in the prediction of soil loss and in the definition of best management practices of single slopes. However, despite its potential of application, a few factors of the equation are difficult to obtain, such as the slope length factor (L factor), particularly in watersheds. The purpose of the present study was to apply the USLE, which was originally developed for individual slopes, to large watersheds. In order to achieve that, a methodology for automatic calculation of the L factor, was developed by Desmet and Govers (1996), using a geographic information system (GIS). This methodology was used to estimate the actual erosion. Existing thematic maps, in association with ancillary information about soil, land use, relief and climate, were used in order to obtain GIS coverages. These coverages were overlaid on the GIS and maps of actual erosion were generated. This study concludes that 67.2% of the total area of the Rio Paracatu basin is within the soil loss tolerance limit (less to 10 t.ha<sup>-1</sup>/year). In addition, the slope length factor, as developed by Desmet and Govers (1996), which accounts for accumulated flow, showed satisfactory results in a large watershed. The proposed methodology was validated with sedimentometric data in two sections of the watershed, and measured and calculated silting yield data agreed.

KEY WORDS: erosion, USLE, L factor, GIS.

### RESUMO

A equação universal de perda de solo (EUPS) é amplamente utilizada na predição de perda de solo e na definição de práticas adequadas de manejo em vertentes individuais. Contudo, alguns fatores da equação são de difícil obtenção em bacias hidrográficas, como é o caso do fator de comprimento de vertente (fator L). Neste sentido, aplicou-se a EUPS para análise de uma bacia hidrográfica de médio porte, a bacia do Rio Paracatu. Em termos específicos, este trabalho visou o emprego da metodologia de cálculo automático do fator L, desenvolvido por Desmet & Govers (1996), com o suporte de um sistema de informações geográficas (SIG). Essa metodologia foi empregada na estimativa da erosão atual. Mapas temáticos existentes, juntamente com informações sobre solos, uso da terra, relevo e clima, foram utilizados para a obtenção de coberturas, que cruzadas no SIG, produziram mapas de erosão atual. Na estimativa da perda de solo, verificou-se que 67,2% da área total da bacia do Rio Paracatu ainda se encontram dentro da tolerância de perda de solo (inferior a 10 t.ha<sup>-1</sup>/ano). A adaptação do cálculo do fator de comprimento de vertente (L), seguindo a metodologia de Desmet & Govers (1996), que considera o fluxo acumulado, teve resultado satisfatório. A metodologia empregada mostrou-se válida, uma vez que os aportes de sedimentos anuais calculados em seções onde havia dados sedimentométricos, ficaram próximos dos valores observados.

PALAVRAS-CHAVE: erosão, EUPS, fator L, SIG.

### INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural indispensável para qualquer nação. Entretanto, seu uso indevido pode contribuir para a sua degradação, com resultados nefastos à economia e à qualidade de vida do seu povo, podendo inclusive comprometer o desenvolvimento sustentável. O processo erosivo promovido pelas águas pluviais em superfície, que

tem início com a erosão laminar, pode prosseguir na forma de sulcos, ravinas e voçorocas, causando problemas à cobertura pedológica. Consequentemente, com a deposição dos sedimentos nas baixadas e nos corpos d'água, traz-se grandes prejuízos ao meio ambiente.

Como parte do planejamento e controle da erosão, a quantificação da perda de solo pelo processo de erosão atual é importante não apenas para a identi-

1. Parte da tese de doutorado do autor, apresentada à Universidade de Brasília (UnB)/Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Trabalho recebido em maio/2002 e aceito para publicação em abr./2004 (registro nº 497).

2. Universidade Federal de Goiás, Caixa Postal. 131, CEP 74001-970, Goiânia, GO. E-mail: valter@agro.ufg.br

ificação de áreas críticas, mas também para o planejamento conservacionista regional. Modelos de simulação, como os de predição de erosão hídrica, são ferramentas importantes para a pesquisa e para a aplicação das práticas agrícolas adequadas. Aplicados à situação de campo, esses modelos auxiliam na determinação das práticas conservacionistas e de manejos mais indicados para os diferentes cenários de aplicação. Um dos modelos mais empregados na simulação da erosão é a equação universal de perda de solo (EUPS – Wischmeier & Smith 1978). Esta é útil para identificar áreas potencialmente erodíveis e zonas sujeitas à sedimentação.

A bacia do Rio Paracatu, objeto deste trabalho, apresenta evidências significativas de erosão, representadas por perda dos horizontes superficiais do solo (erosão laminar), ravinamentos, voçorocas e assoreamento em vários trechos de seus rios. Nessa bacia (que possui área de 44.922 km<sup>2</sup>), o aumento das áreas erodidas é decorrente, em grande parte, da substituição de formações florestais nativas por usos diversos. Dentre as áreas degradadas pelas atividades de garimpo e de mineração destacam-se a região do Morro do Ouro, localizada nas cabeceiras do Córrego Rico, em Paracatu-MG, que já foi objeto de recuperação, e a região do Município de Vazante. Além do potencial erosivo mencionado, a bacia do Rio Paracatu foi selecionada para este estudo por sua importância estratégica regional – integrante da bacia do Rio São Francisco.

A EUPS é amplamente utilizada na predição da erosão e na definição das melhores práticas de manejo. Entretanto, esta equação é frequentemente utilizada de forma incorreta, ou aplicada a situações para as quais ela não foi projetada. Conseqüentemente, erros são gerados, o que colabora para o descrédito da modelagem e, em última análise, para o fracasso de programas conservacionistas (Wischmeier 1976). Não obstante, alguns fatores da equação são de difícil obtenção, como é o caso do fator de comprimento de vertente (fator L).

Em função do exposto, objetivou-se estimar a erosão atual da bacia do Rio Paracatu, na escala de 1:500.000, utilizando o modelo EUPS e empregando técnicas de geoprocessamento. Para tanto, fez-se a adaptação do fator de comprimento de vertente (L), conforme proposto por Desmet & Govers (1996) e sua aplicação a um sistema de informações geográficas (SIG). Com a finalidade de validar os resultados, os valores de perda média anual de solo (erosão atual), depois de transformados em aporte

de sedimento, foram comparados aos dados sedimentométricos de duas estações da mesma bacia.

## MATERIAL E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do Rio Paracatu está compreendida entre os paralelos 15° 30' e 19° 30' de latitude Sul e entre os meridianos 45° 10' e 47° 30' de longitude Oeste. Mais de 93% da superfície da bacia situa-se na região noroeste do Estado de Minas Gerais, com pequenas partes incluídas no sudeste de Goiás e leste do Distrito Federal. É uma das principais sub-bacias do Vale do São Francisco.

A equação universal de perda de solo (EUPS) tem, em sua versão original, a seguinte forma (Wischmeier & Smith 1978):

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

em que:

A: é a perda média anual de solo (t.ha<sup>-1</sup>/ano);

R: é o fator de erosividade da chuva (MJ.mm)(ha.h)<sup>-1</sup>;

K é o fator de erodibilidade do solo, em (t.ha.h)(ha.MJ.mm)<sup>-1</sup>;

L: é o fator de comprimento de vertente (adimensional);

S: é o fator de declividade (adimensional);

C: é o fator de uso/manejo (adimensional); e

P: é o fator de práticas conservacionistas (também adimensional).

Utilizando a EUPS, estimou-se a erosão atual considerando os fatores componentes dos termos da formulação daquele modelo. O fator de erosividade da chuva (R) foi calculado com base nos totais mensais e anuais de chuva empregando a equação de Carvalho *et al.* (1991).

$$EI_{30} = 111,17 (r^2/P)^{0,69} \quad (2)$$

em que:

EI<sub>30</sub>: é a média mensal do índice de erosividade, em (MJ.mm)(ha.h)<sup>-1</sup>; r é a média do total mensal de precipitação (mm); e

P: é a média do total anual de precipitação (mm).

A estimativa da erodibilidade do solo (fator K) foi obtida pelo georreferenciamento do mapa de solos (escala de 1:500.000) do Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia do Rio Paracatu (Brasil 1998). Criaram-se *labels* relativos à classe de solos utilizando o *software* ArcInfo (ESRI 1995). No *software* ArcView (ESRI 1996), esse mapa foi transformado de vetorial para raster com resolução de 100 m, para posterior cruzamento com as demais

coberturas da erosão atual. Para a bacia do Rio Paracatu, a equação utilizada foi desenvolvida com coeficiente de determinação elevado ( $R^2 = 0,92$ ), a partir de dados básicos de Denardin (1990):

$$K = 3,4 \times 10^{-4} (\%AG) + 1,05 \times 10^{-3} (\%Silte) - 6,7 \times 10^{-4} (\%OFe) \quad (3)$$

em que: %AG é a porcentagem de areia grossa; e %OFe é a porcentagem de óxido de ferro.

Na determinação do fator topográfico (LS), 28 cartas topográficas, na escala de 1:100.000 foram usadas. Estas haviam sido previamente vetorizadas pela Codevasf. Através do *software* ArcInfo, utilizando o módulo "Topogrid", fez-se a junção e edição das cartas (curvas em nível, hidrografia e pontos cotados) para geração do *modelo numérico do terreno* (MNT), com resolução de 100 m.

Para determinar o fator de comprimento de vertente foi empregado o algoritmo de Desmet & Govers (1996):

$$L_{i,j} = \frac{[(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j-in})^{m+1}]}{[D^{m+2} x_{i,j}^m (22,13)^m]} \quad (4)$$

em que:

$L_{i,j}$ : é o fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i, j);

$A_{i,j-in}$ : é a área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j) ( $m^2$ );

D: é o tamanho da grade de células (m);

$x_{i,j}$ : é o valor da direção do fluxo; e

m: é o coeficiente que assume os valores: 0,5, se  $s \geq 5\%$  (s é o grau de declividade); 0,4, se  $3\% \leq s < 5\%$ ; 0,3, se  $1\% \leq s < 3\%$ ; e 0,2, se  $s < 1\%$ .

Esse algoritmo emprega o conceito de contribuição de área. Para cada pixel calcula-se a declividade, a direção de fluxo e a quantidade de fluxo que se acumulou a montante daquele pixel. Dessa maneira, o fator de comprimento de vertente (L), para vertentes complexas, é facilmente calculado. Assim, com base no MNT e utilizando-se o *software* ArcView, determinou-se: o mapa de declividade (s); o mapa do coeficiente da declividade (m); a direção de fluxo que gerou o mapa de  $x_{i,j}$ ; e o fluxo acumulado. Utilizou-se o mapa de direção de fluxo para determinar  $x_{i,j}$ . O tamanho da célula (D), como foi definido para todas as coberturas neste trabalho, foi de 100 m. A área de contribuição ( $A_{i,j-in}$ ) foi determinada pelo produto do fluxo acumulado com a área de cada célula ( $10.000 m^2$ ). Definido os parâmetros  $A_{i,j-in}$ , D,  $x_{i,j}$  e m, foi possível determinar o fator L.

O fator de declividade (S) foi calculado segundo a metodologia de Wischmeier & Smith (1978):

$$S = 0,00654 s^2 + 0,0456 s + 0,065 \quad (5)$$

em que: S é o fator de declividade (adimensional); e s é a declividade média da vertente (%).

O fator de uso e manejo do solo (fator C) e o fator de práticas conservacionistas (fator P) foram obtidos a partir de imagens TM do satélite Landsat, referentes à passagem de 1999 nas bandas 3, 4, e 5 e composição 4-5-3 (RGB). A bacia do Rio Paracatu engloba parte de seis cenas: órbita 219 – pontos 72 e 73; órbita 220 – pontos 71, 72 e 73; e órbita 221 – ponto 71. Estas imagens foram submetidas a procedimentos de classificação digital supervisionada, por meio de aplicativos contidos no *software* Erdas. Assim, obteve-se uma imagem temática classificada, cujas classes de uso e ocupação de solos foram definidas segundo a Tabela 1. À cada uma das classes de uso do solo foram associados valores de C e P da EUPS (Tabela 1), segundo dados da literatura, que se assemelhassem às condições da bacia em estudo. Como na maioria das áreas de agricultura intensiva nessa bacia há o emprego de práticas conservacionistas, tais como o plantio em contorno, com e sem terraceamento, e tendo essas áreas declives inferiores a 5%, o valor de P = 0,5, estimado por Wischmeier & Smith (1978) e reconhecido por Bertoni & Lombardi Neto (1990), foi selecionado. Para as demais classes de uso e cobertura vegetal, atribuíram-se valores de P = 1.

A estimativa da erosão atual (A) foi obtida do cruzamento (produto) de todos os planos de

Tabela 1. Valores do fator C para as classes da bacia do Rio Paracatu

Classe de uso e ocupação do solo	Fator C
Água	0,000
Área urbana	0,001
Vegetação de Várzea	0,001
Mata	0,012
Reflorestamento	0,012
Pastagem	0,025
Cerrado <sup>1</sup>	0,042
Campo <sup>1</sup>	0,042
Agricultura de sequeiro	0,180
Agricultura irrigada	0,180
Mineração	1,000

<sup>1</sup>- Embora o cerrado seja uma vegetação mais densa do que o campo, utilizou-se o mesmo valor para o fator C, devido à dificuldade de distinção destas classes na escala 1:500.000, em uma área de 44.922 km<sup>2</sup>.

informação referentes aos fatores da EUPS, usando a equação 1, através do comando "Map Calculate" do ArcView. Para validar os resultados, os valores da perda anual média de solo (erosão atual), depois de transformados em aporte de sedimento (conforme as equações 6 e 7), foram comparados aos dados sedimentométricos de duas estações da bacia do Rio Paracatu: Posto de Santa Rosa – que abrange uma área de drenagem de 13.067 km<sup>2</sup>, com produção média anual de sedimento de 154,4 t.ha<sup>-1</sup>/ano) e Posto de Porto Alegre – com superfície de drenagem de 42.171 km<sup>2</sup>, e produção média anual de sedimento de 123,4 t.ha<sup>-1</sup>/ano. Assim foram calculadas as perdas médias de solo, em cada sub-bacia, considerando o seu total (100%) e eliminando os maiores valores extremos (5% e 10%):

$$\text{SDR} = 100 Y / A.a \quad (6)$$

em que: SDR é a relação aporte de sedimento (%); Y é o aporte de sedimento no exutório da bacia (t/ano); A é a perda de solo média no interior da bacia (t.ha<sup>-1</sup>/ano); e "a" é a área da bacia (ha). A relação de aporte de sedimento (SDR) depende, entre outros fatores, da área de drenagem da bacia. Renfro (1975) afirma que em locais onde os dados de SDR são inexistentes, este pode ser calculado de forma aproximada, utilizando-se o inverso da área da bacia elevada a potência 0,2, isto é:  $\text{SDR} = 1/a^{0.2}$  (equação 7); sendo "a", aqui, a área da bacia em milhas quadradas.

Com o objetivo de verificar valores pontuais da erosão atual, foi traçada uma linha transversal imaginária (*transect*) de aproximadamente 180 km, na bacia do Rio Paracatu. Tomaram-se seções em distâncias de 18 km. Em cada uma delas (A,B,C,...,K) registrou-se, num raio de 500 m, o menor e o maior valor da erosão atual (A). Mediram-se todos os fatores de A para esses pontos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a distribuição sazonal do fator R para a bacia em estudo. Os valores do fator R, para as estações dentro e em torno da bacia, variaram de 6.266 a 9.769 (MJ.mm)(ha.h)<sup>-1</sup> com valor médio de 7774 (MJ.mm)(ha.h)<sup>-1</sup>, desvio padrão de 712 (MJ.mm)(ha.h)<sup>-1</sup>, e coeficiente de variação de 0,09. A erosividade na bacia do Rio Paracatu tem valores mínimos em torno de 6300 (MJ.mm)(ha.h)<sup>-1</sup> na parte nordeste da bacia (fz do Rio Paracatu), onde a precipitação esteve próxima de 1000 mm. Esta aumenta à medida que se aproxima do extremo oeste

da bacia, com erosividade próxima a 8800 (MJ.mm)(ha.h)<sup>-1</sup> e precipitação em torno de 1700 mm. Os extremos sul e norte também contam com altos valores de erosividade.

A distribuição espacial do fator K está diretamente relacionada à variabilidade dos solos na bacia do Rio Paracatu (Figura 2), tendo em vista que a erodibilidade é uma propriedade inerente ao tipo de solo. Esses valores estão listados na Tabela 2. As unidades de mapeamento estão apresentadas conforme a antiga terminologia e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (entre parênteses), proposto pela Embrapa (1999). Os valores de K, obtidos para a bacia do Rio Paracatu, foram comparados com os dados de K medidos e compilados por Chaves (1994), para o Vale do São Francisco, e por Denardin (1990), para os solos do Brasil, obtendo-se boa concordância.

O produto, pixel a pixel, do fator de comprimento de vertente (fator L) obtido pela metodologia de Desmet & Govers (1996), com o fator de declividade (fator S), empregando a equação de Wischmeier & Smith (1978), produziu o fator topográfico (LS) (Figura 3). O método de Desmet & Govers (1996) tem a vantagem de fornecer, pixel a pixel, o valor de LS, ao longo das vertentes. Como pode se observar na Figura 3 (detalhe), o valor de LS é baixo nos interflúvios (topos de morros e chapadas), uma vez que o comprimento de vertente e a declividade são reduzidos (ponto B, na Figura 3). Por outro lado, onde há distâncias significativas do divisor de água e onde há convergência de fluxo (vertentes côncavas), bem como altas declividades, o valor de LS tende a ser elevado (ponto A, na Figura 3).

Assim como a espacialização do fator K está diretamente relacionada a distribuição dos solos, os fatores uso/manejo dos solos e práticas conservacionistas estão relacionados ao uso e cobertura vegetal da bacia hidrográfica (Figura 4). Verifica-se que a agricultura de sequeiro é bastante expressiva, principalmente em áreas aplainadas dos Planaltos do São Francisco, e a agricultura irrigada, embora seja uma importante atividade econômica da região, ocupa pequena área em relação ao total da bacia. A silvicultura, também, é considerada uma atividade relevante na região, com maior predominância na porção centro-leste. A vegetação de várzea ocorre nas áreas marginais baixas dos principais rios, com características próprias de vegetação de áreas inundáveis. As áreas de mineração estão representadas pela exploração de ouro em Paracatu-MG, e chumbo e zinco em Vazante-MG. Onde os condicionantes de relevo e recursos de solos limitaram

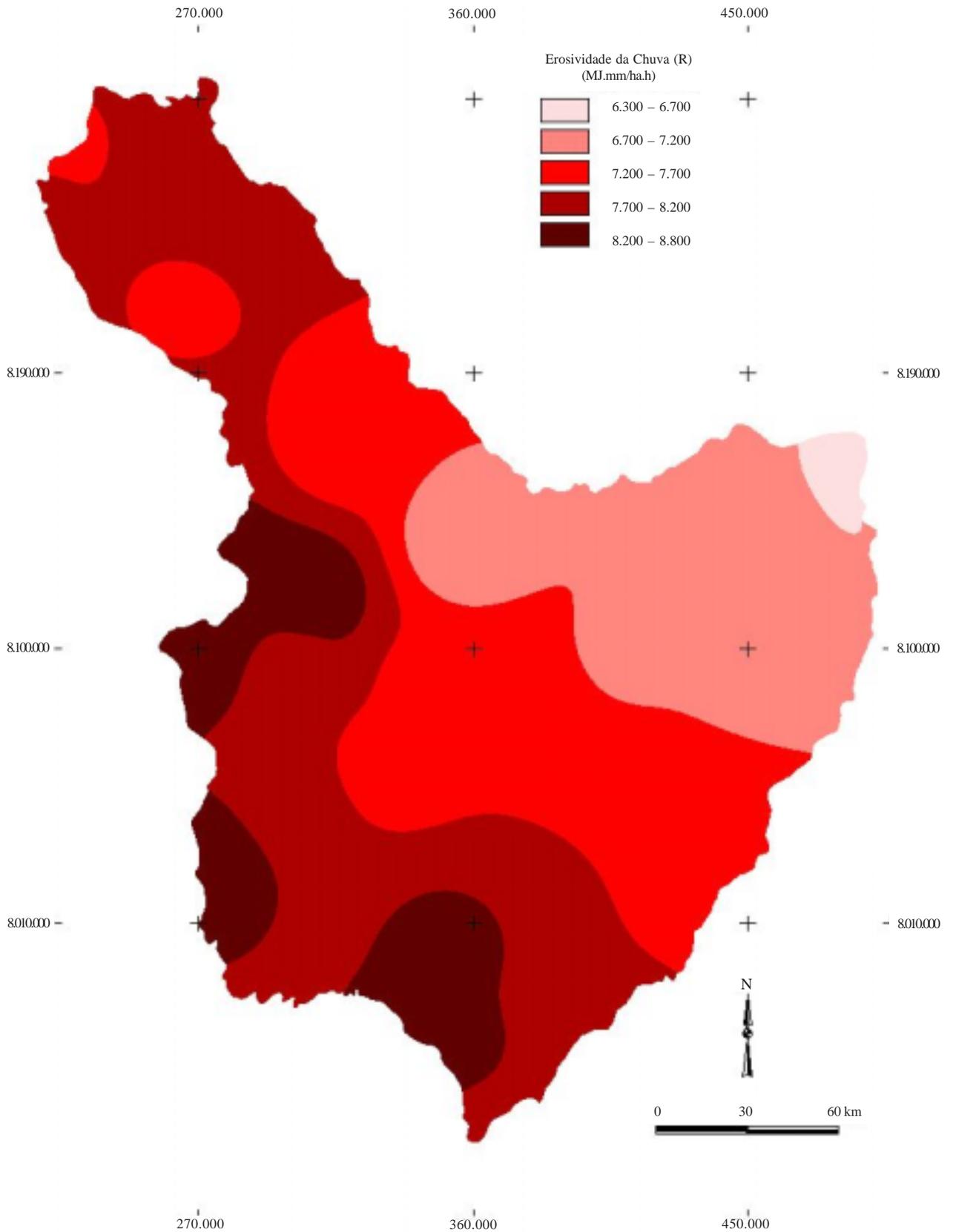


Figura 1. Mapa de distribuição de classes de erosividade da chuva (R) na bacia do Rio Paracatu

a atividade agropecuária, bem como a ocupação humana, observa-se remanescentes da vegetação natural de Mata, Cerrado e Campo Cerrado. O Cerrado (*stricto sensu*) e Campo Cerrado ocupam cerca de 30% da área total da bacia, e as Matas, aproximadamente, 15%. Sob a denominação de Mata encontram-se diversas formações de florestas.

A distribuição da erosão atual (A) na bacia do Rio Paracatu, estimada pela EUPS (equação 1), é representada na Figura 5. A Tabela 3 lista a proporção de cada uma das classes de perda de solo em toda bacia. De acordo com Bertoni & Lombardi Neto (1990), a tolerância de perda de solo para solos típicos do Brasil – quantidade de terra que pode ser

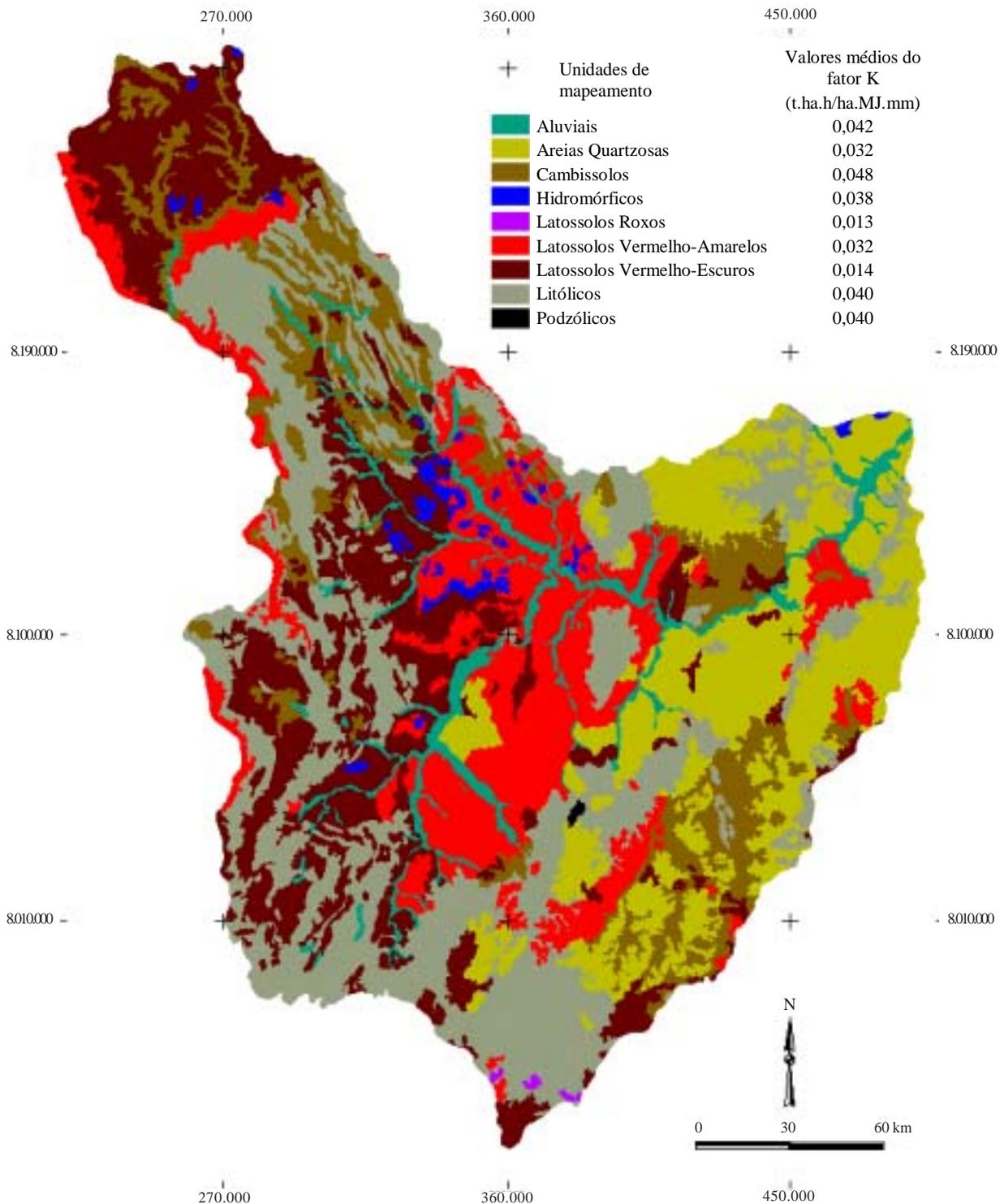


Figura 2. Mapa de solos e valores médios do fator erodibilidade do solo (K) na bacia do Rio Paracatu

Tabela 2. Erodibilidade dos solos (fator K)<sup>1</sup> da bacia do Rio Paracatu

Sigla	Unidade de mapeamento	Média dos valores de K (t.ha.h)(ha.MJ.mm) <sup>-1</sup>
A	Aluviais (Neossolos Flúvicos)	0,042
AQ	Areias Quartzosas (Neossolos Quartzarênicos)	0,032
C	Cambissolos (Cambissolos)	0,048
HG	Hidromórficos (Gleissolos)	0,038
LR	Latossolos Roxos (Latossolos Vermelhos)	0,013
LV	Latossolos Vermelho-Amarelos (Latossolos Vermelho-Amarelos)	0,032
LE	Latossolos Vermelho-Escuros (Latossolos Vermelhos)	0,014
PE	Podzólicos Vermelho-Escuros (Argissolos Vermelhos)	0,040
R	Litólicos (Neossolos Litólicos)	0,040

<sup>1</sup>- Os valores de K nesta tabela são médias, enquanto os da Tabela 4 são valores pontuais (pixel a pixel).

perdida por erosão, expressa em toneladas por unidade de superfície e por ano, que ainda mantém o solo produtivo por longo período de tempo (sustentabilidade) – está na faixa de 4,5 a 15,0 t.ha<sup>-1</sup>/ano, com uma média de 10 t.ha<sup>-1</sup>/ano. Dessa forma, pode-se observar que 67,2% da área da bacia do Rio Paracatu está abaixo da média de tolerância. Todavia, 32,8% da área apresenta perdas superiores com implicações importantes para a sustentabilidade da produção e para o meio ambiente. Cabe lembrar que áreas com perda de solo acima do tolerado são também potencialmente produtoras de grande quantidade de sedimentos que, chegando aos cursos d'água e reservatórios, tenderão a assoreá-los. Essas áreas devem ser manejadas de forma adequada, para que os valores de perda de solo caiam abaixo dessa tolerância.

Observando-se a Figura 5 verifica-se que a distribuição espacial da perda de solo na bacia do Rio Paracatu está associada à sua geomorfologia. As áreas mais críticas quanto à erosão atual, com valores superiores a 10 t.ha<sup>-1</sup>/ano, estão localizadas nas regiões das Cristas de Unaí (norte da bacia - letra A, na Figura 5); nas encostas dos Planaltos do São Francisco; nas nascentes dos Rios Paracatu, Entre Ribeiros e Rio Escuro (oeste da bacia – letra B, na Figura 5); nas regiões de cabeceira do Rio da Prata e do Rio do Sono (sul e sudeste da bacia – letra C, na Figura 5); e nas regiões ocupadas por minerações, que são destacadas na Figura 4. As áreas com menores perdas de solo ocorrem em locais rebaixados e aplainados da Depressão Sanfranciscana (região central da bacia – letra D, na Figura 5) e nas

superfícies tabulares dos Planaltos do São Francisco, onde predominam Latossolos.

Os valores de perda de solo também foram baixos ou até mesmo nulos nas áreas com solos hidromórficos (gleissolos) e aluviais (neossolos flúvicos). As áreas agrícolas têm um fator C médio elevado (0,18) no cálculo da erosão atual (A); apesar disso, não se verificaram nessas áreas altos valores de A, pois encontram-se em terrenos com declives suaves (Depressão Sanfranciscana e regiões de Chapada), associadas a solos relativamente poucos erodíveis (Latossolos). Nas regiões onde há presença de solos litólicos (neossolos litólicos) houve elevadas taxas de erosão. Esses valores são agravados nas escarpas íngremes dos Planaltos do São Francisco ou nas Cristas de Unaí. Apesar de essas regiões serem muito críticas em relação à erosão, pode-se observar no mapa de uso e cobertura vegetal que ainda estão recobertas com a vegetação natural (mata, cerrado e campo), amenizando o processo de perda de solo. Uma vez removida essa vegetação natural, a erosão tenderia a se agravar. Essas áreas são de uso agrícola bastante restrito e, de um modo geral, de equilíbrio ambiental frágil, sendo consideradas de preservação permanente. Em regiões ocupadas por minerações, os valores de perda de solo foram elevados (os maiores valores da bacia), por serem regiões consideradas como altamente erodíveis (valores de C e P iguais à unidade).

A EUPS estima apenas a erosão laminar e em sulcos e não prevê a erosão hídrica concentrada sob forma de ravinas e voçorocas (Wischmeier 1976). Portanto, é possível que em áreas da bacia onde esses tipos de erosão sejam importantes e pontuais, a perda de solo tenha sido subestimada.

Com respeito às estimativas da erosão atual (A) em pontos específicos da bacia (Tabela 4), pôde-se constatar: a) os fatores R e K praticamente não tiveram influência na diferença do valor de A para as duas leituras em todos os pontos medidos; b) no ponto A, o fator S foi o maior responsável pela diferença entre os valores da erosão atual (o valor da primeira leitura foi 105 vezes maior que o da segunda leitura), sendo também determinante o fator L, que aumentou seu valor em quatro vezes; conjuntamente o fator topográfico LS aumentou em 420 vezes o valor de A da primeira leitura em relação à segunda; c) no ponto B, apesar de o fator C também ter influenciado a erosão (diferença de 3,5 vezes entre as duas leituras), o que mais contribuiu para o alto valor de A para a primeira leitura foi o fator S, que aumentou a diferença entre as leituras em 15,88 vezes; d) os pontos C, E e

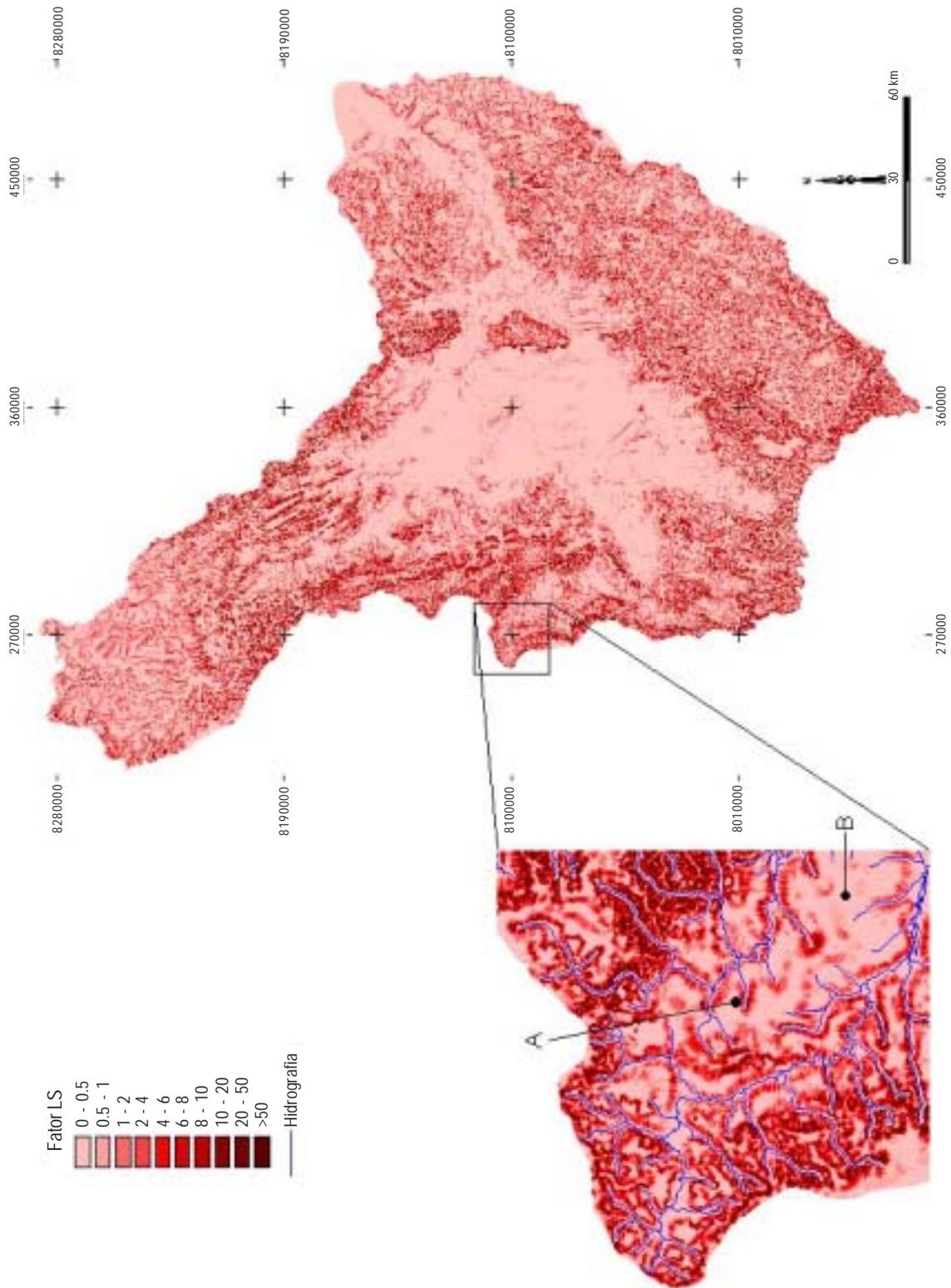


Figura 3. Mapa do fator topográfico (LS) da Bacia do Rio Paracatu (A - fator L elevado; B - fator L reduzido)

F apresentaram valores inferiores aos de tolerância de perda de solo; e) nos pontos D, H e K, o fator que mais contribuiu para os altos valores da erosão atual foi o fator de comprimento de vertente (L), aumentando em doze vezes o valor de A da primeira para a segunda leitura, no ponto D, em cinco vezes, no ponto H, e em treze vezes, no ponto K; e f) nos pontos G, I e J o fator topográfico foi o que mais

contribuiu para que os valores de A tivessem acima dos valores de tolerância de perda de solo.

Considerando as duas estações sedimentométricas citadas por Carvalho (1994), ou seja, a de Porto Alegre e a de Santa Rosa, duas sub-bacias do Rio Paracatu foram delimitadas. Comparando-se os aportes de sedimento estimados neste trabalho ( $Y_1$ ) com os calculados ( $Y_2$ ) por Carvalho (1994), observa-

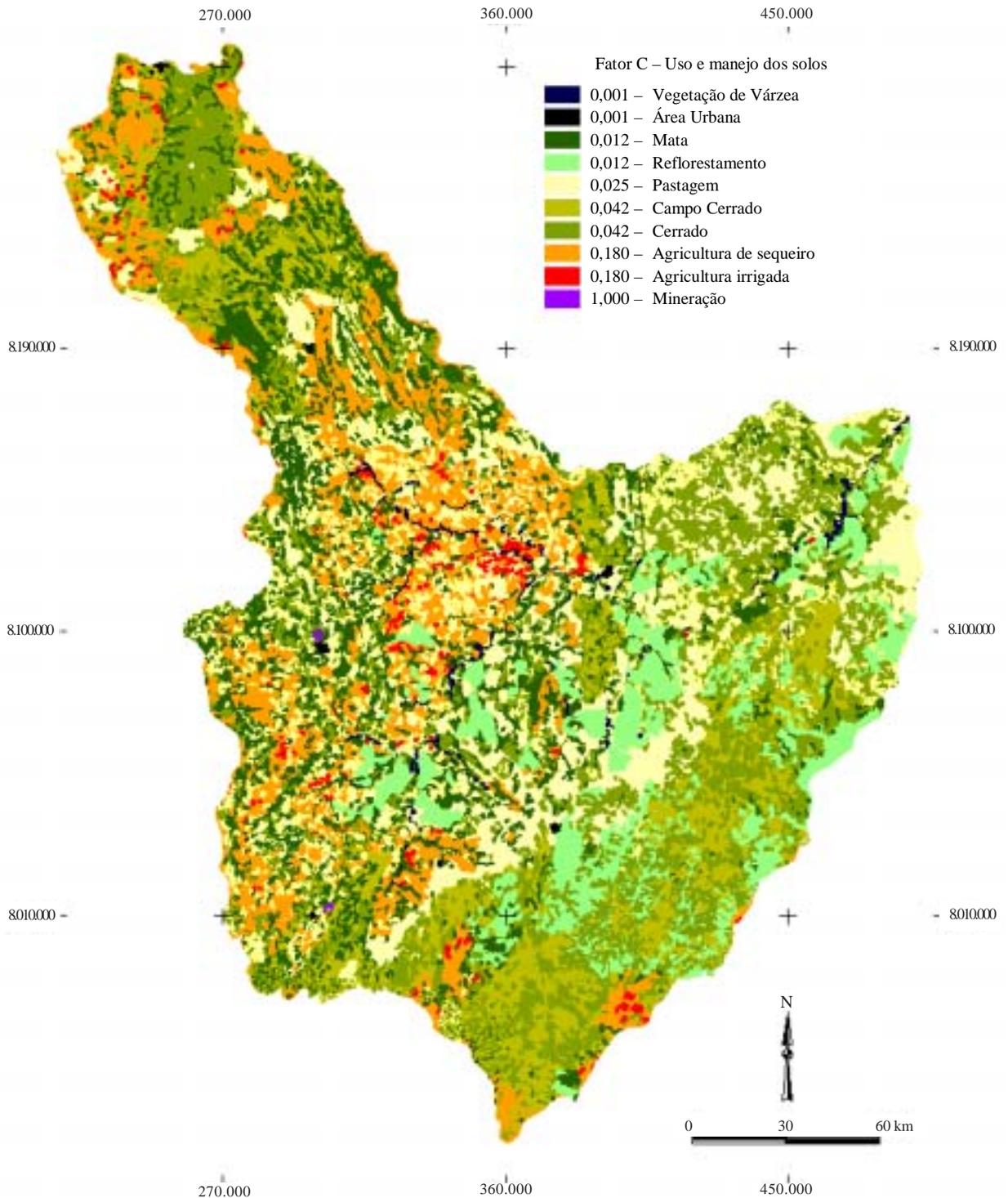


Figura 4. Mapa de uso e manejo do solo e valores do fator C na bacia do Rio Paracatu

se que o erro relativo entre os aportes, quando considerados todos os valores da erosão atual, foi bastante alto (Tabela 5). Esse erro foi considerável quando se excluíram os 5% e os 10% maiores valores para a sub-bacia a montante da Estação de Porto Alegre e para a de Santa Rosa somente quando se excluíram os 10% maiores valores. Embora a sub-bacia delimitada com base na Estação de Porto Alegre

(42.171 km<sup>2</sup>) possui uma área aproximadamente quatro vezes maior do que a sub-bacia delimitada, tendo como referência a Estação de Santa Rosa (13.067 km<sup>2</sup>), verifica-se que os resultados estimados no presente trabalho para Porto Alegre aproximaram-se mais dos valores reportados por Carvalho (1994). Por outro lado, a sub-bacia a montante da Estação de Santa Rosa, abrange uma área bastante acidentada

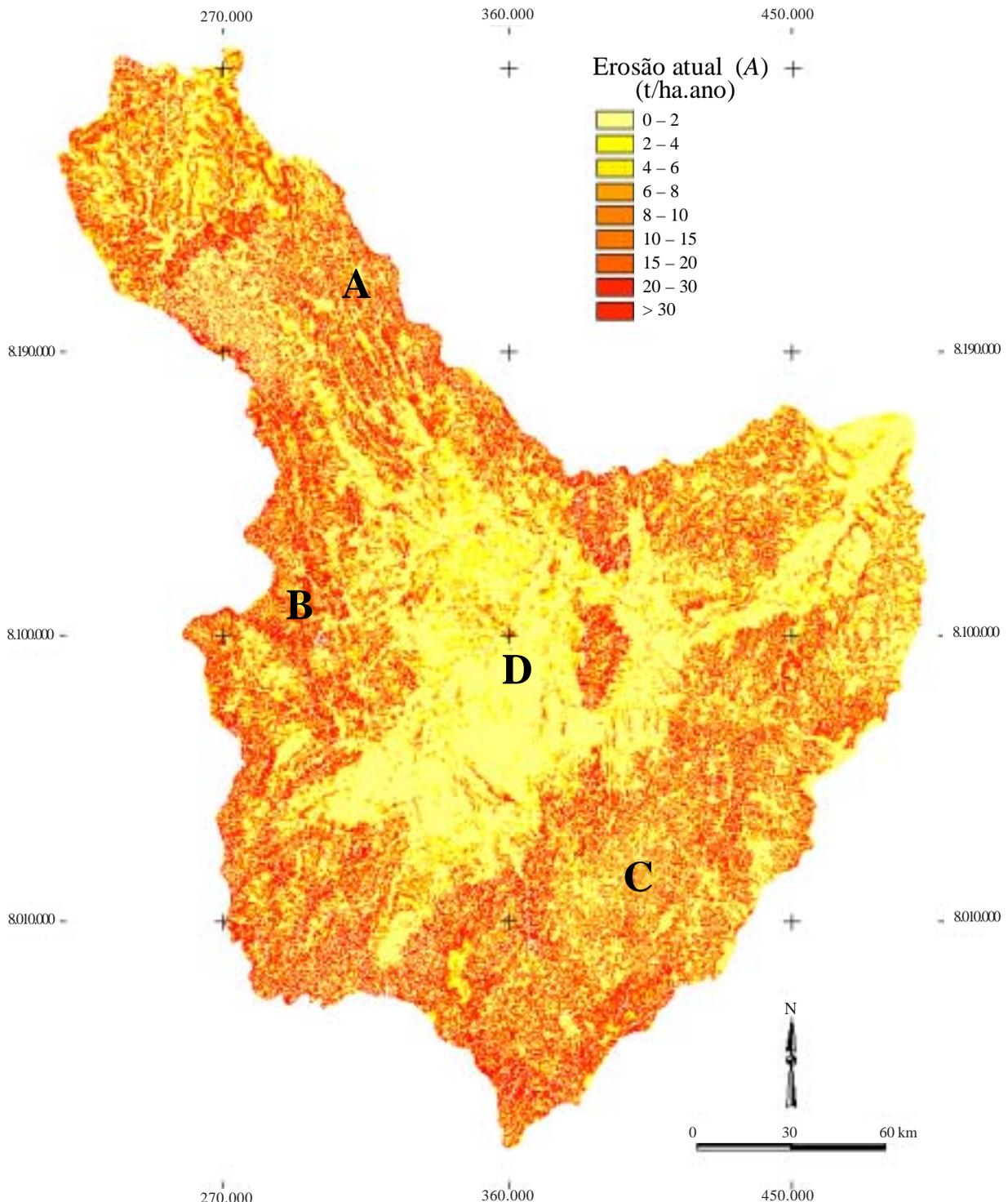


Figura 5. Mapa da erosão atual (A) da bacia do Rio Paracatu, com indicações das regiões de Cristas de Unaí (A), das nascentes dos Rios Paracatu, Entre Ribeiros e Rio Escuro (B), da cabeceira dos Rios da Prata e do Sono (C) e da Depressão Sanfranciscana (D).

Tabela 3. Frequência das classes de erosão atual (A) na bacia do Rio Paracatu

A (t.ha <sup>-1</sup> /ano)	Área (km <sup>2</sup> )	Freq. Relat. (%)	Freq. Acum. (%)
0-2	9639	41,8	41,8
2-4	5225	11,6	53,4
4-6	2914	6,5	59,9
6-8	1907	4,2	64,1
8-10	1374	3,1	67,2
10-15	2488	5,5	72,7
15-20	1700	3,8	76,5
20-30	2226	5,0	81,5
>30	8290	18,5	100,0

e, por isso, é mais influenciada por pequenas variações de uso e ocupação do solo. Carvalho (1994) utilizou os dados sedimentométricos no período entre 1976 e 1982. Como neste trabalho foram empregados dados mais atuais (imagens Landsat TM de 1999), a

maior utilização do solo para atividades agropecuárias provavelmente contribuiu para que as diferenças, concernentes à Estação de Santa Rosa, fossem relativamente mais altas.

Os valores de aporte de sedimento estimados (Y<sub>1</sub>) variaram de 129,9 t/ano a 758,4 t/ano para as duas seções da bacia. Estes indicam que são valores médios em relação a outros postos sedimentométricos do Vale do São Francisco, citados por Carvalho (1994). As implicações desses resultados são o alto risco de sedimentação dos reservatórios existentes e projetados na bacia do Rio São Francisco.

Levando-se em conta as incertezas envolvidas no processo preditivo e a grande variabilidade de produção de sedimentos nas bacias, os resultados obtidos validam a metodologia usada na estimativa da perda de solo (A). Segundo Chaves (1995), uma das vantagens da EUPS é exatamente a sua estrutura fatorial, na qual os erros de estimativa dos parâmetros tendem a se contrabalançar, reduzindo as incertezas das estimativas.

Tabela 4. Erosão atual (A) em pontos da bacia do Rio Paracatu (A, B, C, ..., K)

	Lei- tura <sup>1</sup>	R (MJ.mm)(ha.h) <sup>-1</sup>	K (t.ha.h)(ha.MJ.mm) <sup>-1</sup>	L (adim.)	S (adim.)	C (adim.)	P (adim.)	A <sup>2/</sup> (t.ha <sup>-1</sup> /ano)
A	1 <sup>a</sup>	8247	0,027-LVd5	5,03	10,52	0,012-Mata.	1	141,39
	2 <sup>a</sup>	8246	0,027-LVd5	1,26	0,10	0,180-Agric.	0,5	2,52
B	1 <sup>a</sup>	7960	0,036-Rd2	1,79	6,51	0,042-Cerrado	1	140,25
	2 <sup>a</sup>	7955	0,036-Rd2	1,83	0,41	0,012-Mata	1	2,58
C	1 <sup>a</sup>	7923	0,015-LEd1	4,95	0,11	0,18-Agric.	0,5	5,82
	2 <sup>a</sup>	7924	0,015-LEd1	2,49	0,10	0,18-Agric.	0,5	2,66
D	1 <sup>a</sup>	7600	0,015-LEd1	25,00	0,49	0,025-Pasto	1	34,91
	2 <sup>a</sup>	7596	0,015-LEd1	2,12	0,49	0,025-Pasto	1	2,96
E	1 <sup>a</sup>	7603	0,034-LVd7	1,95	0,10	0,025-Pasto	1	1,26
	2 <sup>a</sup>	7603	0,034-LVd7	1,26	0,08	0,012-Mata	1	0,31
F	1 <sup>a</sup>	7702	0,034-LVd7	2,80	0,11	0,18-Agric.	0,5	7,26
	2 <sup>a</sup>	7700	0,034-LVd7	4,82	0,12	0,012-Mata	1	1,82
G	1 <sup>a</sup>	7664	0,040-PE	5,01	3,98	0,025-Pasto	1	152,82
	2 <sup>a</sup>	7666	0,040-PE	1,83	0,27	0,025-Pasto	1	3,79
H	1 <sup>a</sup>	7575	0,036-Rd2	7,34	1,00	0,012-Refl.	1	24,02
	2 <sup>a</sup>	7572	0,036-Rd2	1,41	0,13	0,012-Refl.	1	0,60
I	1 <sup>a</sup>	7475	0,031-AQd3	3,27	3,57	0,042-Campo	1	113,62
	2 <sup>a</sup>	7474	0,048-Ca3	1,57	0,18	0,042-Campo	1	4,26
J	1 <sup>a</sup>	7388	0,048-Ca3	3,27	2,31	0,042-Campo	1	112,51
	2 <sup>a</sup>	7389	0,048-Ca3	1,26	0,11	0,042-Campo	1	2,06
K	1 <sup>a</sup>	7348	0,036-Rd1	17,89	0,75	0,042-Cerrado	1	149,07
	2 <sup>a</sup>	7348	0,036-Rd1	1,35	0,07	0,042-Cerrado	1	1,05

<sup>1</sup>- A primeira leitura corresponde ao maior valor da erosão atual e a segunda, ao menor valor.

<sup>2</sup>- A = R.K.L.S.C.P

Tabela 5. Aporte de sedimentos estimados neste estudo ( $Y_1$ ) e calculados ( $Y_2$ ) por Carvalho (1994), para duas sub-bacias (A e B)<sup>1</sup> da bacia do Rio Paracatu

Sub-bacias <sup>1</sup>	Valores da erosão atual	A (t.ha <sup>-1</sup> /ano)	$Y_1$ (t/ano)	$Y_2$ (t/ano)	Erro relat. (%) ( $Y_2 - Y_1$ ) / $Y_2$
A	100%	32,35	$1,96 \times 10^7$	$5,20 \times 10^6$	276,98
	95%	13,68	$8,29 \times 10^6$	$5,20 \times 10^6$	59,42
	90%	9,05	$5,48 \times 10^6$	$5,20 \times 10^6$	5,46
B	100%	41,48	$9,91 \times 10^6$	$2,02 \times 10^6$	391,67
	95%	18,65	$4,43 \times 10^6$	$2,02 \times 10^6$	119,47
	90%	12,31	$2,92 \times 10^6$	$2,02 \times 10^6$	44,86

<sup>1</sup>- A: Sub-bacia à montante da Estação de Porto Alegre (42.171 km<sup>2</sup>); B: Sub-bacia à montante da Estação de Santa Rosa (13.067 km<sup>2</sup>).

## CONCLUSÕES

1. A equação universal de perda de solo (EUPS) pode ser empregada na estimativa da erosão atual e erosão potencial em grandes bacias (como a bacia do Rio Paracatu), quando adaptada a um sistema de informações geográficas (SIG). Este mostrou-se eficiente na integração de dados para a identificação e caracterização da perda de solo, de maneira prática e com rapidez na geração de resultados, possibilitando a avaliação dos diversos cenários de uso da terra, dando subsídio às estratégias de controle de erosão.
2. A adaptação do fator de comprimento de vertente (L) da EUPS, segundo a metodologia de Desmet & Govers (1996), que considera o fluxo acumulado na vertente, teve resultados satisfatórios.
3. As áreas mais críticas quanto à perda de solo estimada estão associadas a elevadas declividades. Numa análise de sensibilidade dos fatores da EUPS, observou-se que os fatores R e K não alteraram significativamente os valores de A, os quais são mais influenciados pelo Fator Topográfico (LS).
4. Na estimativa da erosão atual verificou-se que 72,7% da área total da bacia possuem valores de perda de solo inferiores a 15 t.ha<sup>-1</sup>/ano. Esse índice é considerado como a tolerância de perda máxima de solo (Bertoni & Lombardi Neto 1990), com um grau de conservação tal que mantenha uma produção econômica em futuro previsível com os meios técnicos atuais.
5. A metodologia empregada na estimativa da erosão atual e potencial mostrou ser válida, uma vez que os aportes de sedimentos anuais, calculados com

base nos valores de erosão atual e por meio de relações sedimentológicas, ficaram próximos dos valores medidos por Carvalho (1994), quando foram eliminados os 10% maiores valores da erosão atual.

## REFERÊNCIAS

- Bertoni, J. & F. Lombardi Neto. 1990. Conservação do solo. Ícone, São Paulo. 335 p.
- Brasil. 1998. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal – MMA. Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH. Plano diretor de recursos hídricos da Bacia do Rio Paracatu – Planpar. Relatório Síntese, R7. Consórcio Magna / DAM / EYSER. 135 p.
- Carvalho, M. P., F. Lombardi Neto, J. Vasques Filho & A. Cataneo. 1991. Correlação entre o índice de erosividade  $EI_{30}$  médio mensal e o coeficiente de chuva do município de Mococa-SP. Científica, 19 (1): 1-7. 1991.
- Carvalho, N. O. 1994. Hidrossedimentologia prática. CPRM, Rio de Janeiro. 372 p.
- Chaves, H. M. L. 1994. Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do São Francisco. Relatório Final de Consultoria, Codevasf – FAO, Brasília. 35 p.
- Chaves, H. M. L. 1995. Aplicação de modelos na previsão da erosão. p. 49 - 54. In Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 5. Bauru, São Paulo. Anais.
- Denardin, J. E. 1990. Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, São Paulo. 81 p.
- Desmet, P. J. J. & G. Govers. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation, 51 (5): 427-433.

- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1999. Sistema brasileiro de classificação de solos. Serviço de Produção de Informação, Brasília. 412p.
- ESRI. 1995. Understanding GIS. The ARC/Info method. Self study workbook. Version 7 for Unix 95.
- ESRI. 1996. Using ArcView GIS. Environmental Systems Research Institute, INC. California/USA.
- Renfro, G. W. 1975. Use of erosion equations and sediment-delivery ratios for predicting sediment yield. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. ARS-S-40, Oxford, MS. p 33-45.
- Wischmeier, W. H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. J. of Soil and Water Cons, Ankeny, 31 (1): 5-9.
- Wischmeier, W. H. & D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Washington. 58 p. (Agriculture Handbook 537).