

***Modelagem de perda de solo por erosão
e testes de sensibilidade à variação de fatores***

Prof.^a Andrea de Oliveira Cardoso

Perdas de Solo - Erosão

- **Erosão:** Desgaste do solo, pelo processo de desprendimento e arraste das partículas, ocasionado principalmente pelos agentes diretos vento e água. Fatores indiretos como mudanças de temperatura, atividade biológica e gelo-degelo também contribuem para o processo. Em condições naturais, esse processo geralmente ocorre de forma lenta, que ocorre ao longo dos anos; atividades humanas podem acelerar significativamente sua intensidade.
- **Classificação:** Erosão hídrica (água líquida); Erosão eólica (vento) e Erosão glacial (degelo).

Erosão hídrica:

- Erosão pluvial: causada pela ação das chuvas;
- Erosão fluvial: pela ação dos rios;
- Erosão lacustre: pela ação dos lagos;
- Erosão marinha: causada pela água do mar.

Formas erosão hídrica:

Laminar: lavagem da superfície do solo em terrenos arados (superficial);

Em sulcos: concentração de água escorrendo em pequenos sulcos;

Ravinas: erosão mais profunda que a anterior (ex. grandes valas);

Voçorocas: formada quando os sulcos foram bastante erodidos em largura e profundidade (forma bem intensa de erosão, por grandes enxurradas que passam, ano após ano, no mesmo sulco).

Erosão hídrica => degradação ambiental

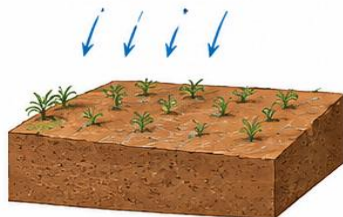
- Assoreamento de rios;
- Poluição de águas;
- Redução da capacidade produtiva do solo.

Tipos de erosão hídrica do solo

Erosão laminar (superficial)



Lavagem da superfície do solo em terrenos arados, sem formação de canais definidos. É a forma mais inicial e, muitas vezes, mais difícil de perceber visualmente.

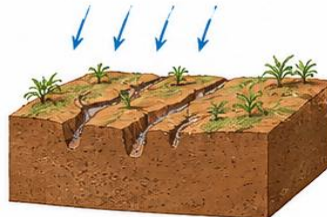


Superfície do solo desgastada de forma uniforme.

Erosão em sulcos (linear inicial)



Concentração da água escoando em pequenos sulcos, que se formam no sentido da declividade do terreno.

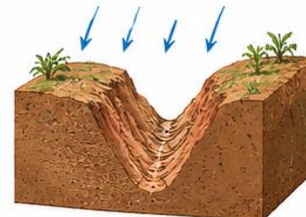


Pequenos canais (sulcos) na superfície do solo.

Ravinas (mais profunda)



Erosão mais profunda que a anterior, formando valas maiores e mais acentuadas no terreno.

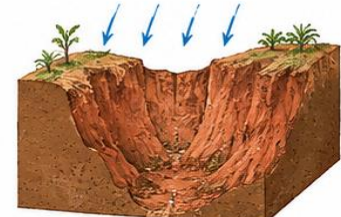


Canal mais profundo e largo que os sulcos.

Voçorocas (erosão intensa)



Formada quando os sulcos foram bastante erodidos em largura e profundidade. É uma forma bem intensa de erosão, envolvendo grandes enxurradas, que podem ocorrer ano após ano no mesmo local, além de processos de desmoronamento das margens.



Grande vala, com alta profundidade e largura.

Aumento da intensidade e da profundidade da erosão

Erosão hídrica => degradação ambiental: Assoreamento de rios;
Poluição de águas; Redução da capacidade produtiva do solo.

Perdas de Solo - Erosão hídrica

A erosão hídrica possui três fases: **desagregação**, **transporte** e **deposição** de partículas de solo e água da chuva (depósito de assoreamento).

Erosão pluvial => devido ao impacto das gotas de chuva e o escoamento superficial.

Magnitude
do processo erosivo:

chuvas

infiltração

topografia
do terreno

natureza
do solo

cobertura
vegetal

manejo e práticas
conservacionistas

(Bertoni e Lombardi Neto, 2005)

(Pissarra et al., 2005)

Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS ou USLE)

- Modelo empírico - ajusta os valores calculados aos dados observados por meio de funções (relações baseadas na observação).
- Desenvolvido originalmente para faixas agrícolas dos EUA, para subsidiar o planejamento de uso do solo (Wischmeier e Smith, 1978);
- De simples aplicação, por exigir variáveis observadas ou estimadas através de métodos simplificados (fatores naturais e antrópicos);
- Precisão razoável, dependendo do detalhamento e da confiabilidade das variáveis de entrada;
- É o mais utilizado no Brasil, devido à facilidade de aplicação e disponibilidade dos dados requeridos;
- A modelagem restringe-se à perda de solo média para longos períodos, que ocorrem a partir da erosão laminar e também por sulcos.

- *USLE foi revisado (RUSLE) (Renard et al., 1991 e Renard et al., 1994),*
- *WEPP (processo físico de perda de solo em diferentes escalas de espaço (Flanagan, 1995).*

Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS ou USLE)

A equação engloba um conjunto de fatores naturais e antrópicos para a estimativa de perda de solo :

$$A = R . K . L . S . C . P$$

Onde:

A = Perda de solo calculada em unidade de área (t/ha.ano);

R = Fator erosividade da chuva (MJ.mm/ha.h.ano);

K = Fator erodibilidade do solo (t.h/MJ.mm);

L = Fator comprimento de rampa ou da encosta (adimensional);

S = Fator grau de declividade do terreno ou da encosta (adimensional);

C = Fator uso e manejo do solo (adimensional);

P = Fator prática conservacionista (adimensional).

Fatores
naturais

Fatores
antrópicos

sendo as unidades: MJ (megajoule), mm (milímetro), ha (hectare), h (hora) e t (tonelada)

Obtenção dos fatores da equação

Erosividade das chuvas (**Fator R**)

- Método mais simplificado - requer médias de longo prazo de precipitação mensal e anual.

$$R = \sum_{j=1}^{12} EI_{30j}$$

R – erosividade média anual (MJ.mm/ha.h.ano) ;

EI_{30j} – valores mensais do índice de erosão (MJ.mm/ha.h) ; *j* – mês do ano.

$$EI_{30} = 67,355 (r^2/P_a)^{0,85}$$

onde: **EI₃₀** = média mensal do índice de erosão (MJ.mm/ha.h);

r = precipitação média mensal em milímetros (mm)

P_a = precipitação média anual em milímetros (mm).

**Média de
longo prazo**

Obtenção dos fatores da equação

Erosividade das chuvas (**Fator R**)

- Método mais detalhado - necessário dados horários históricos de precipitação (pluviógrafos)

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI_{30})_k$$

$$EI_{30} = E_c \cdot I_{30}$$

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \cdot \log I$$

R – erosividade média anual (MJ.mm/ha.h.ano);
n – número de anos da série histórica de precipitação;
m_j – número de eventos erosivos do ano **j**;
EI₃₀ – índice de erosividade do evento **k**.

I₃₀ – intensidade máxima da chuva em 30 min (mm/h);

E_c - Energia cinética total da chuva (MJ/ha.mm);

I – intensidade da chuva (mm/h);

- Erosividade no Brasil: Oliveira et al. (2013) e Trindade et al. (2016)

Obtenção dos fatores da equação

Fator erodibilidade do solo (**Fator K**)

Considera as características intrínsecas do solo, quanto a sua resistência ao processo de erosão. É a propriedade do solo que representa a sua susceptibilidade à erosão.

Métodos:

- Determinado experimentalmente através de ensaios específicos: por exemplo, aplicando a metodologia MCT e utilizando o ábaco classificatório (curva de sucção, umidade de saturação); realização de ensaios de estabilidade de agregados, de resistência à compressão, entre outros;
- Inferência utilizando mapeamento geotécnico (dados pedológicos e declividade) e por mapas de erodibilidade;
- Nomograma proposto por Wischmeier et al. (1971): gráficos (% de silte, areia muito fina e argila, teor de matéria orgânica, tipo de estrutura e classe de permeabilidade);

$$\text{Fator } K = \frac{(\% \text{ Areia} + \% \text{ Silte})}{(\% \text{ Argila})} / 100$$

K = erodibilidade de determinado horizonte do solo (t.h/MJ.mm);

% Areia, % Silte e % Argila = porcentagens das respectivas frações para cada horizonte.

Mannigel et al. (2002) e Demarchi et al. (2014)

Obtenção dos fatores da equação

Fator topográfico (Fator LS)

Quanto maior for comprimento de rampa (L) maior será a velocidade do escoamento. O volume e a velocidade das enxurradas estão diretamente relacionados ao grau de declividade do terreno (S).

Métodos:

- Através de geoprocessamento;
- Bases cartográficas (cartas topográficas)
- Obtidos com ábacos;
- Mapeamentos disponíveis.

$$l = Ar/4lc$$

Para uma bacia:

l - comprimento de rampa (m); *Ar* - área da bacia (m²); *lc* - somatório do comprimento de todas as redes de drenagem da bacia (m).

$$LS = 0.00984 \cdot l^{0,63} \cdot s^{1,18}$$

l = comprimento de rampa (m); *s* = declividade (%)

Obtenção dos fatores da equação

Fator uso e manejo do solo (**Fator C**)

Dado pelo grau de cobertura do solo por resíduos e por plantas, sendo dependente do estágio de desenvolvimento das culturas.

- Obtido por experimento de campo;
- Dados de geoprocessamento.

Fator prática conservacionista (**Fator P**)

Se refere à relação entre as perdas de solo de uma área sob dada prática conservacionista e a perda de solo de uma área sem nenhuma destas práticas.

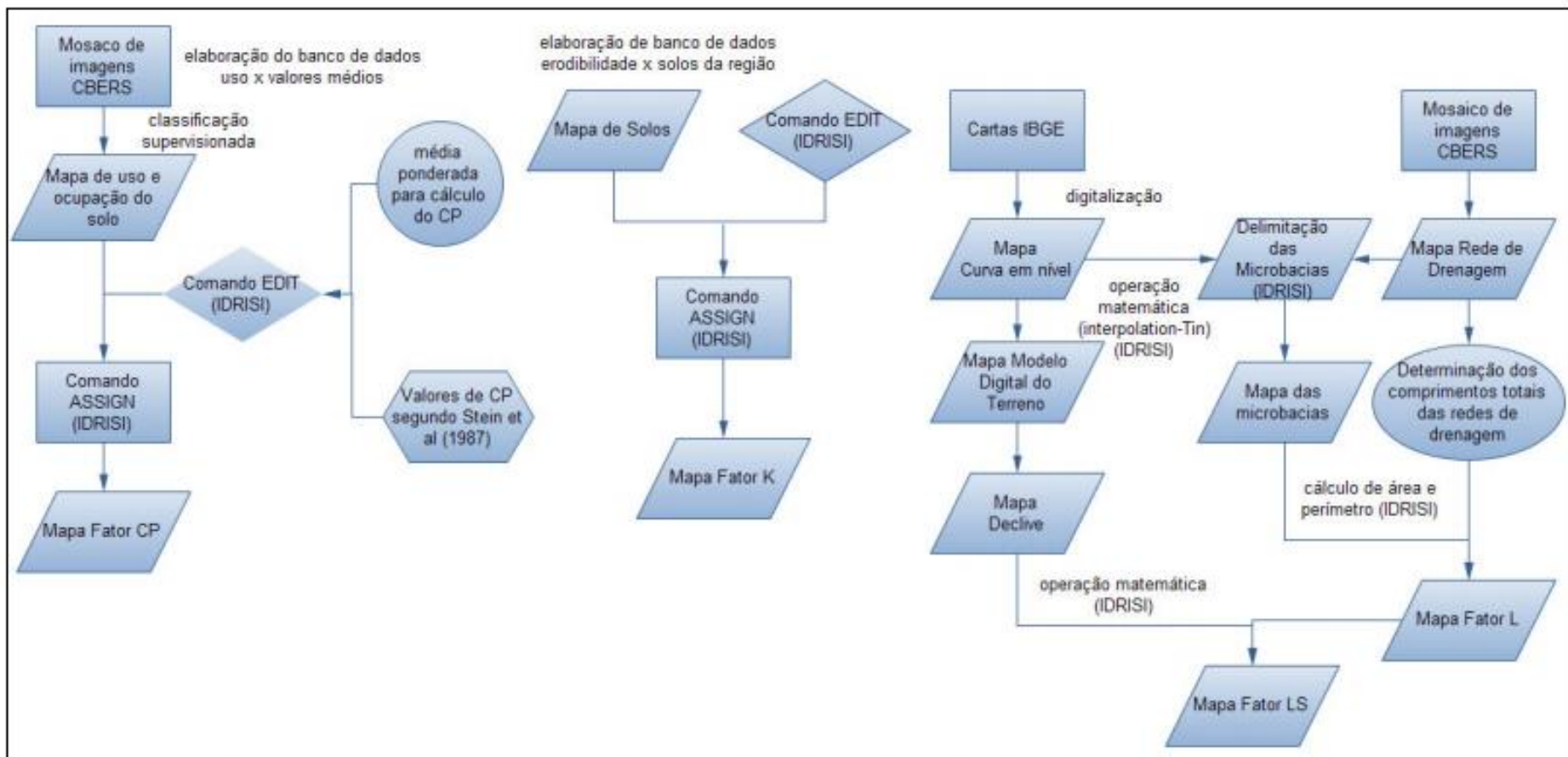
Fator antrópico (**Fator CP**)

Fator CP – variável antrópica:

- Variáveis tratadas separadamente, estudo para minimizar o impacto agrícola;
- Estudo integrado para espacializar fenômenos (via geoprocessamento).

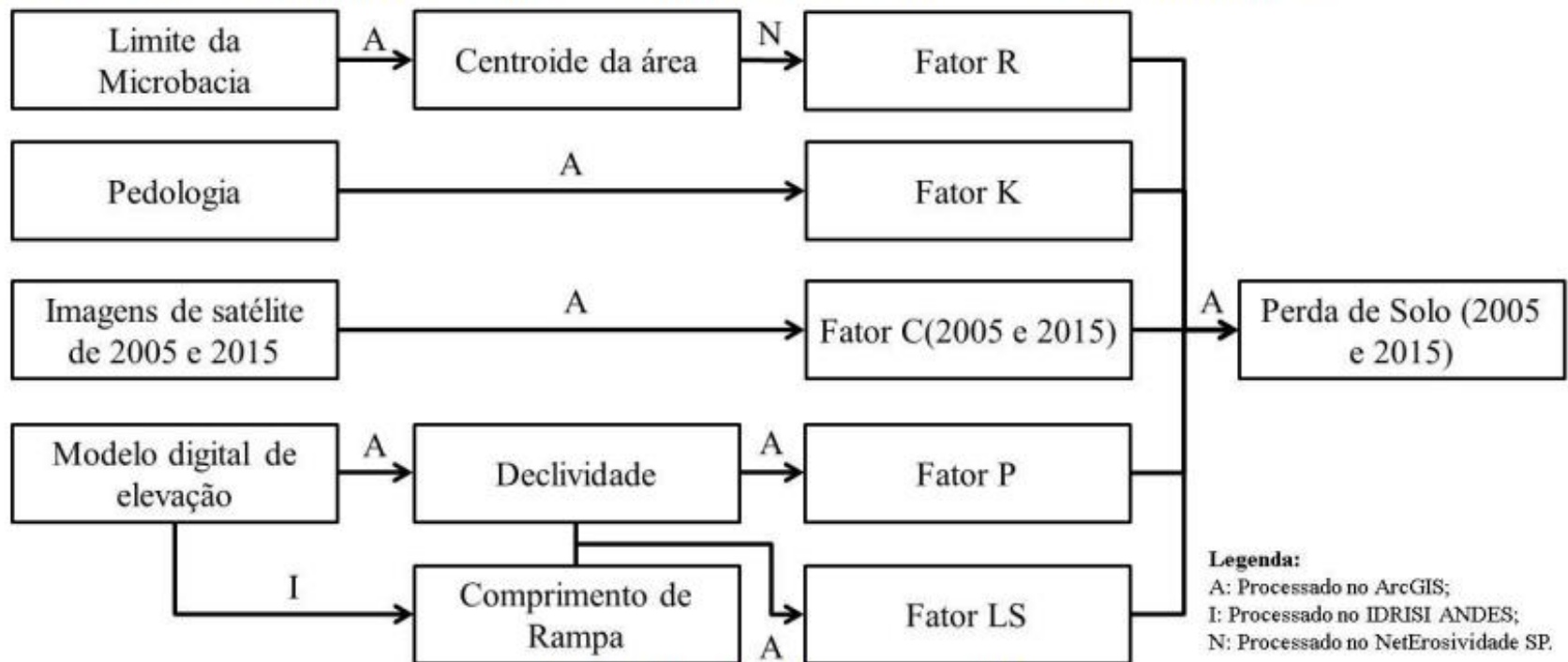
Exemplo de aplicação e obtenção dos fatores Bacia do Rio Uberaba (Valle Jr. et al. 2010)

Metodologia empregada no SIG-IDRISI para a obtenção dos mapas de declive, fator (LS), (L), (CP) e (K). Methodology applied in the GIS-IDRISI for obtaining the decline maps, factor (LS),(L),(CP) and (K).



Exemplo de aplicação e obtenção dos fatores Bacia Ribeirão Preto (Neves. et al. 2018)

Representação esquemática dos dados de entrada, processamento e saídas do trabalho



Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Exemplo de valores de CP utilizados em estudos:

Valores de CP para as diversas classes de uso do solo (atividades). **Values of CP for several classes of soil use (activities).**

Uso	CP (adimensional)
1 - Lagos / Lagoas / Reservatórios	0,00000
2 - Agricultura	0,16370
3 - Pastagem	0,05500
4 - Vegetação nativa(Cerrado/Cerradão/Campo)	0,00522
5 - Reflorestamento (eucalipto, pínus)	0,00010
6 - Solo nu	1,00000

Fonte: Valle Junior et al. (2010)

Classes de C e P adotadas para a Bacia do Rio Urucuia-

MG

Classe	Fator CP
Corpos d água	0,0
Área Urbana	0,0
Áreas Inundáveis ou alagadas	0,0
Mata Ciliar e Cerradão	0,00004
Cerrado	0,00007
Área Rural de Uso Diversificado	0,2

Baseado em Stein *et al* (1987)

Fonte: Mata et al. (2007)

Exemplo de valores de CP utilizados em estudos:

Fator C das principais culturas presentes na Bacia do Córrego Baguaçu.

Estágios de desenvolvimento da cultura	Anual				Estágios de desenvolvimento da cultura*	Mensal	
	Pasto	Eucalipto	Cana planta de ano	Cana planta ano e meio		Milho	Soja
1	0,0402	0,000153	0,0447	0,0517	D	0,0091	0,0139
2	0,0014	0,000471	0,0089	0,0120	P	0,0149	0,0235
3	0,0014	0,000104	0,0089	0,0120	C	0,0170	0,0200
4	0,0014	0,000046	0,0089	0,0120	M	0,0307	0,1535
5	0,0014	0,0000010	0,0089	0,0120	C	0,003	0,0007
6	0,0014	0,000001	0,0089	0,0120		-	-
7	0,0014	0,000024	-	-		-	-
8	0,0014	0,000021	-	-		-	-
9	0,0014	-	-	-		-	-
10	0,0014	-	-	-		-	-
Fator C	0,0049 (média)	0,000829 (total)	0,0149 (média)	0,0186 (média)		0,0720 (total)	0,2116 (total)

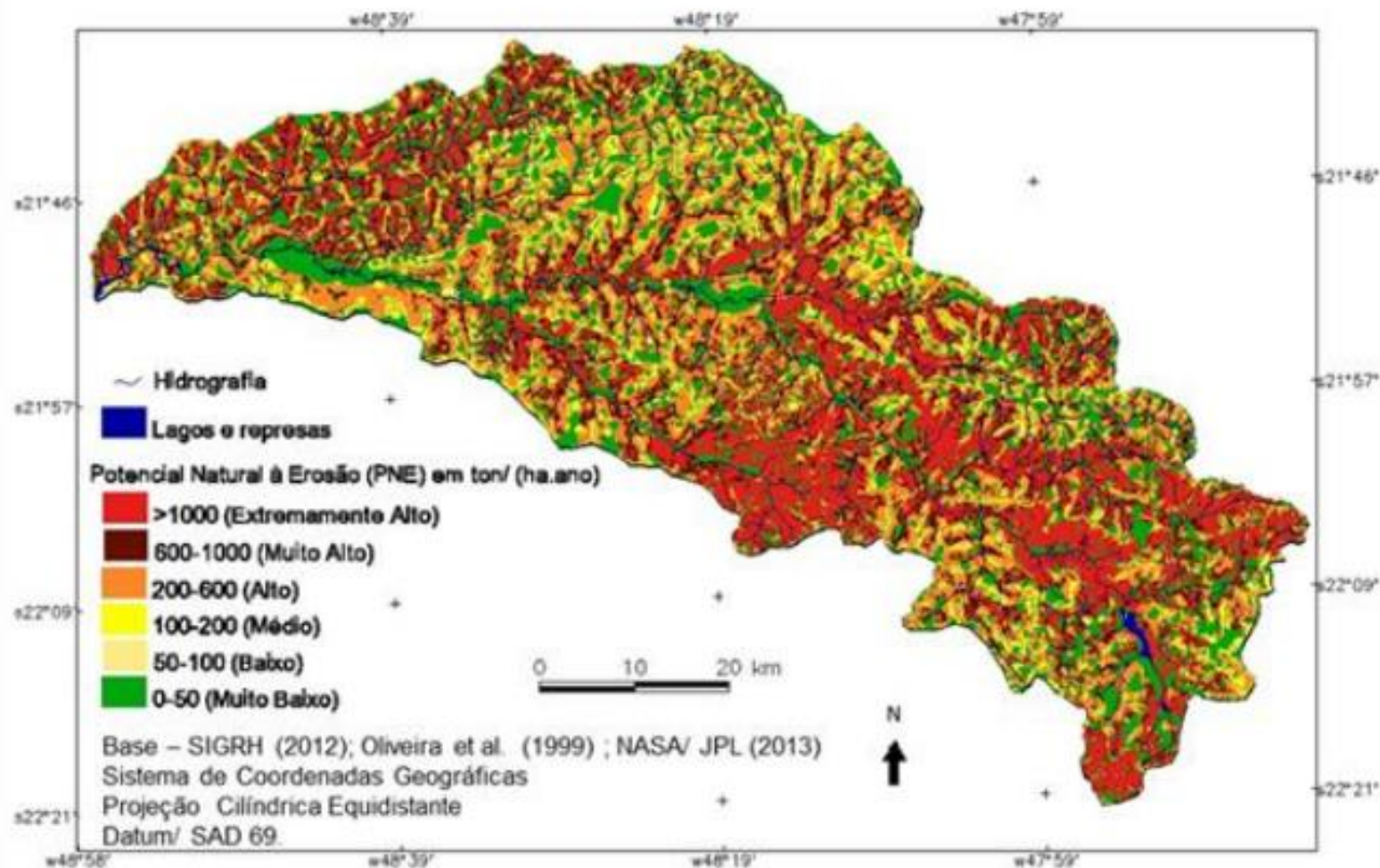
*Período de desenvolvimento, plantio e estabelecimento, crescimento e maturação e colheita.

Fonte: SILVA e LUCHIARI (2016)

Exemplos de forma de apresentação do resultado

SOUZA,V. e GALVANI,E.(2017)

DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL NATURAL À EROSÃO LAMINAR NA BACIA DO RIO JACARÉ GUAÇÚ (SP)



Potencial Natural à Erosão da área de estudo. Elaborado pelos autores..

A3) Prática de aplicação do Modelo EUPS – Testes de sensibilidade

Realize testes de sensibilidade do modelo EUPS (Equação Universal de Perdas de Solo) para estimar as perdas de solo por erosão hídrica, variando os fatores topográfico e antrópico. Para tanto, considere o estudo de caso para uma faixa da região noroeste do Paraná e os seguintes dados:

- Normais climatológicas de precipitação (1981 a 2010), na cidade de Campo Mourão
- PR, em mm, Fonte INMET:

jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Anual
213,2	159,6	133,7	123,4	142,3	97,0	75,8	69,4	142,7	165,8	143,2	171,0	1637,1

Fonte: Souza e Gasparetto (2012)

- Solo predominante: Latossolo Vermelho, com **Fator de Erodibilidade (K): 0,0145 t.h/MJ.mm**
- **Fatores topográficos (LS): 2 e 5**
- **Fatores antrópicos, de acordo com o uso do solo (tabela):**

Uso do solo	Área ocupada em km²	Índice atribuído Fator C	Índice atribuído Fator P
Lago	0,19	0,0	1,0
Vegetação natural (campestre)	29,57	0,003	0,2
Área Urbana	17,74	0,005	1,0
Vegetação natural (florestal)	7,94	0,001	0,2
Cana-de-açúcar	12,68	0,1783	0,5
Soja	15,41	0,5	0,5
Pastagem	98,73	0,01	0,5
Total	182,26		

Através do uso do software Calc ou Excel estime os valores de perda de solo por erosão hídrica e analise o impacto dos fatores topográfico e antrópico.

Instruções:

- Construa o modelo na planilha, separando Entradas (dados) e Saídas (parâmetros gerados pela aplicação de equações);
- Para obter o **Fator R**, considere o método baseado nas médias de precipitação em longo prazo:

$$EI_{30} = 67,355 (r^2/P)^{0,85}$$

$$R = \sum_{j=1}^{12} EI_{30j}$$

- Inclua as entradas variáveis em coluna para facilitar novas simulações e comparações.
- Pode utilizar mais de uma aba para simulações distintas.

$$A = R . K . L . S . C . P$$

Em um arquivo texto, inclua os prints das planilhas, a tabela dos resultados de **A** e compare os impactos dos fatores topográfico e antrópico, considerando a escala de Souza e Galvani (2017).

Prazo: submeter o PDF até 23h do dia 15/10/2026

Referências

- AMORIM, R. S. S. et al. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1046-1049, Dec. 2010.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 5ª ed. São Paulo: Ícone, 2005. 355p.
- BENAVIDEZ, R.; JACKSON, B.; MAXWELL, D.; NORTON, K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 6059–6086, 2018.
- DEMARCHI, J. C. ; ZIMBACK, C. R. L. . MAPEAMENTO, ERODIBILIDADE E TOLERÂNCIA DE PERDA DE SOLO NA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO DAS PEROBAS. *Energia na Agricultura*, v. 29, p. 102-114, 2014.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. In: Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, 1980, Recife, 1980. **Anais...**p1- 13.
- MANNIGEL, A. R. et al. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.
- MATA, C.L.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S. & GUIMARÃES, R.F. Avaliação multitemporal da susceptibilidade erosiva na bacia do rio Urucuia (MG) por meio da Equação Universal de Perda de Solos. *R. Bras. Geomorf.*, 8:57-71, 2007.
- MORGAN, R. P. C. Soil Erosion and Conservation.** 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.
- NEVES, L. L. ; LIMA, R. S. ; FERREIRA, M. D. DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DE PERDA DE SOLO COMO GEOINDICADOR PARA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: BACIA DO RIBEIRÃO PRETO. *BOLETIM DE GEOGRAFIA (ONLINE)*, v. 36, p. 74-87, 2018.
- SOUZA, V.; GASPARETTO, N.V.L. Aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) na bacia do córrego Pinhalzinho Segundo, noroeste do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v.13 n.3 p.267-278. 2012.
- SOUZA, V.; GALVANI, E. Determinação do potencial natural à erosão laminar na Bacia do Rio Jacaré Guaçú (SP). *Curitiba*, v.39, p.8 - 23, 2017.

SILVA, L.C.N; LUCHIARI, A. Estimativa de Perda de Solos por Erosão Laminar na Bacia Hidrográfica do Córrego Baguaçu-SP. Revista do Departamento de Geografia, V. 32 15-28, 2016. STEIN, D.P.; DONZELLI, P.L.; GIMENEZ, A.F.; PONÇANO, W.L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico, na bacia do Peixe -Paranapanema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 3., 1987, Marília. *Anais...* ABGE/DAEE, 1987. v.1, p.105-135.

TARBUCK, Edward J.; LUTGENS, Frederick K.; TASA, Dennis. Geologia Física. Tradução de: *Earth: An Introduction to Physical Geology*. 10. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2013.

OLIVEIRA, P.T.S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. *Catena*, v.100, p.139-147, 2013. DOI: 10.1016/j.catena.2012.08.006.

PISSARRA, T. C.; GALBIATTI, J. A.; BORGES, M. J.; ROSALEN, D.; IHA, D. Avaliação por fotointerpretação do uso/ocupação do solo e erosão acelerada em microbacias hidrográficas utilizando sistemas de informação geográfica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. *Anais...* Goiânia: INPE, 2005.

RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A., PORTER, J.P., 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30 – 33, 1991.

RENARD, K.G., FOSTER, G.R., YODER, D.C., MCCOOL, D.K., 1994. RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future. *Journal of Soil and Water Conservation*, 213 – 220, 1994.

TRINDADE, A. L. F. et al . Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília , v. 51, n. 12, p. 1918-1928, Dec. 2016 .

SOUZA, V.; GASPARETTO, N.V.L. Aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) na bacia do córrego Pinhalzinho Segundo, noroeste do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v.13 n.3 p.267-278. 2012.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P. & OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídricaR. *Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.14, n.2, p.115–123, 2010.

VALLE JÚNIOR, R. F.; GALBIATTI, J. A., MARTINS FILHO, M. V. et al. Potencial de erosão da bacia do rio UberabaEng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.5, p.897-908, 2010.

<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.htm#2>

FLANAGAN, DC; ASCOUGH II, JC; NICKS, AD; NEARING, MA; LAFLEN, JM. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: USDA – Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL, report n° 10. 1995.