

Identificação de fontes de produção de sedimentos em suspensão de uma bacia hidrográfica com geologia complexa.⁽¹⁾

Sara Chagas de Souza⁽²⁾; Ricardo Simão Diniz Dalmolin⁽³⁾; Pablo Miguel⁽⁴⁾; Jean Michel Moura-Bueno⁽⁵⁾; Lucas Henrique Ciotti⁽⁶⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS;

⁽²⁾ Graduada do Curso de Engenharia Florestal da UFSM, bolsista PROBIC/FAPERGS, E-mail: sarachagass@yahoo.com.br; ⁽³⁾ Professor Associado de Departamento de Solos da UFSM; ⁽⁴⁾ Professor Auxiliar da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL); ⁽⁵⁾ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFSM;

⁽⁶⁾ Graduando do Curso de Agronomia da UFSM.

RESUMO: O processo erosivo acelerado tem causado impactos ao meio ambiente, como poluição dos recursos hídricos e assoreamento dos corpos d'água. Atualmente o uso do método *fingerprinting* na identificação de fontes de sedimentos vem se difundindo mundialmente, porém ainda de forma incipiente no Brasil. O objetivo deste trabalho foi identificar a origem dos sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta, com predomínio de solos rasos e geologia complexa. O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, na região central do Estado do Rio Grande do Sul (RS). Foram consideradas duas formações geológicas (sedimentares e vulcânicas) e as fontes de sedimentos estudadas constituíram de canal de drenagem, estradas e camada superficial do solo.

As maiores contribuições relativas de cada fonte de produção de sedimentos se deram nas cotas mais baixas e de solos com textura arenosa, sendo essas as fontes de origem geológica sedimentar.

Termos de indexação: fingerprinting, assoreamento, formações geológicas.

INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural de imprescindível importância para sobrevivência dos seres vivos. Por isso, a perda de solo por erosão hídrica acelerada é considerada um dos maiores problemas ambientais relacionados a esse recurso. Além disso, em áreas de encosta com predomínio de solos rasos os processos erosivos podem ser mais acentuados, causando uma redução significativa da fertilidade do solo (Miguel et al., 2011; Samuel-Rosa et al., 2011) e contribuindo para poluição dos recursos hídricos e assoreamento dos mesmos (Dill et al., 2004).

O Brasil é considerado um país agrícola e apresenta grandes variações de clima, geologia e relevo, possuindo assim, diferentes tipos de solos e com características distintas. Portanto, identificar as fontes de produção de sedimentos é de suma importância, para localizar a origem dos materiais

encontrados nos corpos d'água e posteriormente adotar medidas de prevenção de erosão. O método *fingerprinting* tem se mostrado eficiente na identificação de fontes de sedimentos, sendo utilizado em todo o mundo, (Walling et al., 2008; Minella et al., 2009; Collins et al., 2010; Collins et al., 2012; Miguel, 2013).

Segundo Yu & Oldfield (1989), os sedimentos em suspensão são originados de diferentes fontes e carregam com si características geoquímicas trazidas das mesmas. Dessa forma, é possível traçar a origem dos sedimentos e a proporção com que cada fonte contribui através da avaliação de suas características geoquímicas. Sendo assim, considerar a geologia de uma bacia hidrográfica em estudos de erosão do solo é imprescindível, pois as diferenças químicas e mineralógicas dos mais diversos materiais de origem irão refletir em diferenças na granulometria e composição química dos sedimentos (Walling & Woodward, 1995).

No Brasil, grande parte dos trabalhos são realizados em áreas de relevo suave ondulado, com predomínio de solos profundos e geologia homogênea. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi identificar a origem dos sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta, com predomínio de solos rasos e geologia complexa.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo faz parte da bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, situada na região central do Estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil, delimitada pelas coordenadas W53°35' / W54°00' e S29°32' / S29°40'. Escolheu-se a bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim por fazer parte da bacia de captação de água que abastece o reservatório da Companhia Riograndense de Abastecimento (CORSAN). Onde de acordo com Maluf (2000), o regime pluvial anual médio é de 1500 a 1750 mm, com temperatura média anual de 19,4° C. Nas cotas mais elevadas localizam-se as nascentes, onde há predomínio de rochas vulcânicas e solos mais desenvolvidos. Já em cotas mais baixas, há

presença de rochas sedimentares e a topografia varia de suave ondulada a ondulada, com a ocorrência de solos de textura arenosa (Miguel et al., 2011). As coletas de amostras do solo levaram em consideração à geologia do local, sendo 20 amostras coletadas em locais com presença de rochas vulcânicas (Formação Serra Geral), e 20 em locais com rochas sedimentares (Formação Botucatu e Caturrita). A escolha dos locais de coleta seguiu os padrões de drenagem da bacia (**Figura 1**) e em diferentes usos da terra predominantes na bacia (Samuel-Rosa et al., 2011). Para coleta dos sedimentos em suspensão foi instalado um amostrador (torpedo) no exutório da bacia. Esse equipamento é composto por um cano de PVC, fechado em ambas as extremidades e com pequenos orifícios em cada ponta para a entrada de material. Esse amostrador permaneceu dentro da calha do rio fixado por duas hastas metálicas durante um período de três a quatro meses, (sendo as coletas realizadas em 15 de agosto de 2011, 15 de dezembro de 2011 e 15 de abril de 2012).

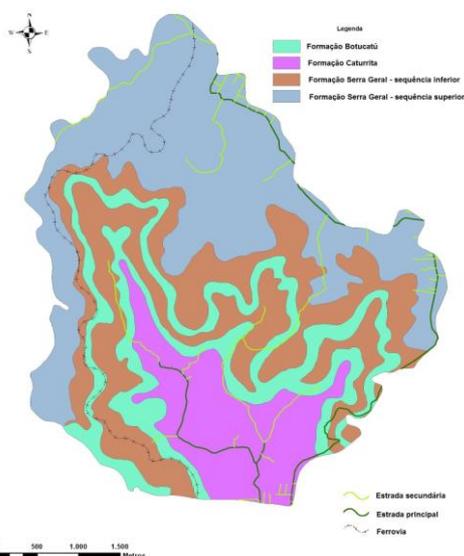


Figura 1 – Mapa geológico da área de estudo. Adaptado de Maciel Filho (1990).

As amostras das fontes e o sedimento em suspensão foram tamisados em peneira com abertura de 63 μm e submetidas a digestão com ácido nítrico (HNO_3) + ácido clorídrico (HCl), segundo o método nº 3050B (EPA, 1996). Os teores de Al, Ba, Be, Ca, Cl, Co, Cu, P, Fe, Pb, Mg, Mn, Mo, Ni, K, Ag, Na, Zn, Tl, e V nesses extratos foram determinados por *Inductively Coupled Plasma* (ICP).

A primeira etapa da análise estatística buscou estabelecer o conjunto de variáveis que apresentaram diferenças significativas na sua concentração entre as fontes a serem identificadas.

Para isso foram utilizados dois testes estatísticos: o teste não-paramétrico *Kruskal-Wallis* (H) e uma função discriminante multivariada.

O teste H testou a hipótese nula de que as fontes são provenientes de uma mesma população. Neste teste foram definidos quais elementos químicos apresentaram diferença estatística entre as fontes de sedimentos, os quais puderam ser utilizados como variáveis traçadoras. O teste foi aplicado para cada variável, verificando sua capacidade individual em discriminar as fontes (Equação 1).

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{s=1}^k \frac{R_s^2}{n_s} - 3(n+1) \quad (1)$$

Posteriormente, o segundo teste foi uma função discriminante multivariada determinando o número mínimo de variáveis que maximiza a discriminação das fontes. O método é baseado no parâmetro *Lambda de Wilks* (Λ^*) da análise de variância multivariada e o critério utilizado pelo modelo estatístico é a minimização de Λ^* (Equação 2). Não existe capacidade discriminante (as fontes são consideradas iguais) do conjunto de variáveis selecionadas quando Λ^* é próximo de 1. Valores próximos de 0 ocorrem quando a variabilidade dentro do grupo é pequena em comparação com a variabilidade total, isto é, a maior parte da variabilidade total pode ser atribuída à diferença entre os grupos.

$$\Lambda^* = \frac{|W|}{|B+W|} \quad (2)$$

Por fim a Equação 3 descreve a relação matemática entre as proporções das fontes e as variáveis das fontes e dos sedimentos em suspensão (Walling e Woodward, 1995).

$$y_i = \sum_{s=1}^n a_{is} P_s \quad (s = 1, 2, \dots, n) \text{ e } (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

Em que y_i : valor da variável i obtida no sedimento em suspensão, a_{is} : coeficientes do modelo linear (concentração do elemento químico i na fonte s) e P_s : a proporção da massa da fonte s , que podem ser apresentados como um conjunto de funções lineares de m variáveis e n fontes. Para determinar os valores de P foi utilizada uma função objetivo (Walling e Woodward, 1995).

A solução é encontrada por meio de um processo iterativo objetivando minimizar o valor de R ($f \text{ mincon}$) (Equação 4). No processo de minimização, os valores de P ficam sujeitos a 2 restrições: ser maiores ou iguais a zero e menores

ou iguais a 1 (Equação 5); e a soma dos P_s deve ser igual a 1 (Equação 6).

$$R = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{C_i - (\sum_{s=1}^n P_s C_{si} Z_s)}{C_i} \right\}^2 \quad (4)$$

$$0 \leq P_s \leq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^g P_s = 1 \quad (6)$$

Em que m é o número de elementos químicos selecionados como variáveis traçadoras; n , o número de fontes; C_i , a concentração da variável traçadora i na amostra de sedimento em suspensão; P_s , a proporção de contribuição da fonte s ; C_{si} , o valor médio da variável traçadora i obtido na fonte s ; e Z_s , o fator de correção granulométrica da amostra da fonte s .

Com os valores do erro relativo de cada variável, foi calculada uma média (ERM) para providenciar um valor único associado a cada amostra de sedimentos em suspensão (Equação 7).

$$ERM = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{C_i - (\sum_{s=1}^n P_s C_{si})}{m} \right\} \quad (7)$$

De acordo com (Walling e Collins, 2000), quando o resultado da Equação 7 apresentar valores menores que 15%, mostra que o modelo encontrou uma solução viável dos valores de P_s (contribuições relativas de cada fonte) provenientes do procedimento de minimização da Equação 4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras foram divididas segundo a geologia para que se pudesse saber qual formação interfere mais na deposição de sedimentos na bacia. Das 21 variáveis analisadas no solo das fontes, através da aplicação do teste estatístico não-paramétrico, denominado teste- H ou *Kruskal-Wallis* em nível de significância de 90% ($H_{crítico} = 2,71$), somente algumas foram selecionadas. Esse teste permite estabelecer se há diferença entre as fontes elencando quais variáveis apresentam capacidade discriminante. Sendo que, as variáveis Na, K e P não foram consideradas por serem influenciadas pelo manejo do solo, e assim tem um enriquecimento grande dentro do sedimento, ou seja, esses elementos foram avaliados no teste de médias (teste H), porém o P, apesar de ter sido selecionado por apresentar diferença significativa entre as fontes, não foi usado na análise

discriminante porque essas variáveis podem ser instáveis no ambiente e podem trazer incertezas ao modelo de predição. Ainda, apenas sete variáveis não apresentaram capacidade discriminante, sendo elas Mg, La, K, Pb, Cr, Na e Si (**Tabela 1**).

Foi realizada a determinação do parâmetro *Wilk's Lambda* (Λ^*) para avaliação dos resultados da análise de variância multivariada e determinar o grupo de variáveis que otimiza a discriminação das fontes (**Tabela 2**). As variáveis foram testadas na análise de variância e aquelas que apresentaram menores valores de Λ^* foram selecionadas para o modelo de classificação. Através da análise discriminante pode ser observado um aumento no conjunto de variáveis de minimização do parâmetro Λ^* (**Tabela 2**). O valor de Λ^* é definido como a proporção da variabilidade total das fontes devido ao erro.

Tabela 1 – Resultados do teste de Kruskal-Wallis para cada variável.

Variáveis	Teste Kruskal-Wallis	
	H ⁽¹⁾	p ⁽²⁾
Teor		
Alumínio (Al)	5,602	0,0179*
Ferro (Fe)	14,445	0,0001*
Cálcio (Ca)	5,602	0,0179*
Bário (Ba)	8,614	0,0033*
Magnésio (Mg)	1,940	0,1636
Lantânio (La)	0,772	0,3793
Manganês (Mn)	8,774	0,0031*
Níquel (Ni)	4,282	0,0385*
Estrôncio (Sr)	4,282	0,0385*
Zinco (Zn)	11,161	0,0008*
Potássio (K)	1,721	0,1895
Titânio (Ti)	4,625	0,0315*
Chumbo (Pb)	0,030	0,8604
Cobre (Cu)	12,654	0,0004*
Cromo (Cr)	0,309	0,8604
Sódio (Na)	0,066	0,7972
Berílio (Be)	6,814	0,0090*
Cobalto (Co)	9,593	0,0020*
Fósforo (P)	6,261	0,0123*
Silício (Si)	1,260	0,2616
Vanádio (V)	6,397	0,0114*

⁽¹⁾Valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado – $H_{crítico}$ (90%;2 gl) = 2,71;

⁽²⁾Probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrado; * valores de $p < 0,10$.

Tabela 2 – Resultado da análise da função discriminante com acréscimo gradual de cada variável e os valores correspondentes da minimização do *Wilk's Lambda* (Λ^*).

Step	1	2	3	4
Variável	Fe	V	Sr	Ca
Λ^*	0,648	0,603	0,571	0,498

acumulado⁽¹⁾

⁽¹⁾Valores acumulados com a adição de cada variável.

O material de origem possui influência direta na quantidade e tipo de sedimento depositado. Segundo Miguel et al. (2011), os solos que predominam na área são solos de textura mais arenosa principalmente no horizonte superficial como a classe dos Argissolos, sendo que até mesmo os solos menos desenvolvidos apresentam essa característica, o que influencia diretamente em qual sedimento será depositado em maior quantidade.

Sendo assim, nas duas primeiras coletas a contribuição relativa de cada fonte de produção de sedimentos foi maior nas fontes sedimentares, com cerca de 55%, enquanto que na terceira coleta, houve uma maior contribuição das fontes vulcânicas (**Figura 2**).

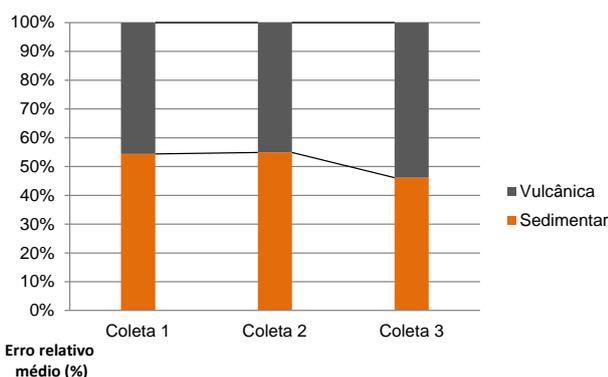


Figura 2 – Contribuição relativa de cada fonte de produção de Sedimentos (sedimentar e vulcânica) na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim, Santa Maria, RS, para três épocas de coleta de Sedimento em suspensão.

CONCLUSÕES

Foi possível identificar a contribuição de cada uma das fontes de produção de sedimentos. O número de elementos químicos determinadas na discriminação foi suficiente para serem usados como traçadores, porém para que pudesse ser expressada toda a heterogeneidade ao longo da bacia, poderiam ter sido adicionados mais amostradores ao longo do leito do rio.

As maiores contribuições se deram das fontes de origem geológica sedimentar, ou seja, cotas mais baixas da paisagem, onde a topografia varia de suave ondulada a ondulada, com a ocorrência de solos de textura arenosa.

REFERÊNCIAS

COLLINS, A. L. et al. Tracing sediment loss from eroding farm tracks using a geochemical fingerprinting procedure

combining local and genetic algorithm optimization. *Science of the Total Environment*, 408: 5461-5471, 2010.

COLLINS, A. L. et al. Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modeling. *Science of the Total Environment*, 414: 301-317, 2012.

DILL, P.R.J. et al. Assoreamento do Reservatório do Vacacaí-Mirim em Santa Maria e a sua relação com a deterioração da Bacia Hidrográfica contribuinte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 9:56-64, 2004.

MALUF, J.R.T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 8, n.1, p.141-150, 2000.

MACIEL FILHO, C. L. Carta geotécnica de Santa Maria. Santa Maria: Imprensa Universitária - UFSM, 1990. 21 p.

MIGUEL, P. et al. Solo e dinâmica de ocupação das terras em áreas do rebordo do planalto do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, 4: 447-455, 2011.

MIGUEL, P. Variáveis pedogeoquímicas e mineralógicas na identificação de fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. 2013. 98 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MINELLA, J. P. G. et al. Método fingerprinting para identificação de fontes de sedimentos em bacia rural. *Rev. Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13: 633-638, 2009.

SAMUEL-ROSA, A. et al. Uso da terra no Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. *Ciência e Natura*, 33:161-173, 2011.

WALLING, D.E. et al. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments. *Journal of Hydrology*, 350:274-289, 2008.

WALLING, D.E. & WOODWARD, J.C. Tracing sources of suspended sediment in river basins: a case study of the River Culm, Devon, UK. *Marine and Freshwater Research*, 46:327-336, 1995.

YU, L.; OLDFIELD, F. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements. *Quaternary Research*, San Diego, 32: 168-181, 1989.