

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**VARIÁVEIS PEDOGEOQUÍMICAS E MINERALÓGICAS
NA IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE SEDIMENTOS EM
UMA BACIA HIDROGRÁFICA DE ENCOSTA**

TESE DE DOUTORADO

Pablo Miguel

**Santa Maria, RS, Brasil
2013**

**VARIÁVEIS PEDOGEOQUÍMICAS E MINERALÓGICAS NA
IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE SEDIMENTOS EM UMA
BACIA HIDROGRÁFICA DE ENCOSTA**

Pablo Miguel

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Simão Diniz Dalmolin

Santa Maria, RS, Brasil

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Miguel, Pablo
VARIÁVEIS PEDOGEOQUÍMICAS E MINERALÓGICAS NA
IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA DE ENCOSTA / Pablo Miguel.-2013.
98 f.; 30cm

Orientador: Ricardo Simão Diniz Dalmolin
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2013

1. fingerprinting 2. mineralogia 3. Bacia
hidrográfica 4. áreas de encosta 5. modelagem I.
Dalmolin, Ricardo Simão Diniz II. Título.

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Pablo Miguel. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua João Goulart 673, apto 301, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-220 Fone (055) 91452001; End. Eletr: tchemiguel@yahoo.com.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**VARIÁVEIS PEDOGEOQUÍMICAS E MINERALÓGICAS NA
IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA DE ENCOSTA**

elaborada por
Pablo Miguel

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Simão Diniz Dalmolin (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Fabrício de Araújo Pedron (UFSM)

Prof. Dr. Jean Paolo Gomes Minella (UFSM)

Prof. Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto (UFPel)

Prof. Dr. Luciano Zucuni Pes (UFSM)

Santa Maria, 19 de abril de 2013.

DEDICATÓRIA

*A Chaiane, minha namorada...
e ao gauchinho mais lindo desse
Rio Grande, meu filho, Luiz
Henrique, dedico este trabalho...*

Agradecimentos

Ao colega, Professor e principalmente amigo, Ricardo Simão Diniz Dalmolin, não somente pela orientação neste trabalho, mas pela amizade e confiança depositada em quase 10 anos de convivência, por todos os ensinamentos e pela exemplar postura profissional.

Ao amigo, colega e Prof. Fabrício de Araújo Pedron, pela ajuda durante todo o trabalho de doutorado, pelos incentivos, pelos ensinamentos de campo e de laboratório e principalmente pelo exemplo de força, dedicação e ética.

A minha namorada Chaiane, pela ajuda e paciência com que enfrentou um namorado escrevendo uma tese de Doutorado. Pela sua dedicação, pelo apoio, pela força que me passou durante todo esse tempo e principalmente por ter acreditado junto comigo.

Ao Prof. Jean Paolo Gomes Minella, pelas orientações durante os experimentos de campo

Ao Prof. Luiz Fernando Spinelli Pinto pela disponibilidade em compor a banca de defesa de Tese.

Ao amigo e Prof. Luciano Zucuni Pes, por fazer parte da banca de defesa de Tese e principalmente por ter me incentivado a ministrar a primeira aula.

A colegas como Jean Michel Moura-Bueno, Alessandro Samuel-Rosa e Sara Chagas, os quais me sinto orgulhoso de um dia ter trabalho ao lado, meu muito obrigado pois certamente divido os créditos desta conquista com esses amigos.

Aos amigos do Laboratório de Pedologia, André Dotto, Gabriel, Vanessa, Rodrigo, Estéfane, Sara, Lincon, Jean Bueno, Ândrea, Juliana, Ruiz, entre tantos outros, muito obrigado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Departamento de Solos.

A minha família, meu Pai Wilson, minha Mãe Roseli, meu irmão Michel André, pelo incentivo, pela confiança, pela ajuda e principalmente por acreditar.

*“Como palanques cravados frente ao rancho
enraizados no chão escorando até tempo feio
que tem coragem, persistência, respeito, e principalmente amor
que tiveram dúvida, medo, saudade
que ensinaram valores onde em mais nenhum lugar do mundo poderia ser
aprendido
que hoje sentem alegria e orgulho pelo guri que fizeram homem.
Wilson e Roseli, pai e mãe, eu agradeço”.*

EPÍGRAFE

*“A sorte é somente concedida
àqueles que têm o espírito
preparado”*

Louis Pasteur

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

VARIÁVEIS PEDOGEOQUÍMICAS E MINERALÓGICAS NA IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DE ENCOSTA

Autor: Pablo Miguel
Orientador: Ricardo Simão Diniz Dalmolin
Local e data da defesa: Santa Maria, 19 de abril de 2013.

O uso da terra de maneira inadequada, ignorando sua aptidão agrícola, em pouco tempo pode transformar milhares de hectares em sistemas frágeis altamente suscetíveis aos processos de degradação. A utilização do método fingerprinting na identificação de fontes de sedimentos, tem se mostrado eficiente e há um grande número de trabalhos na literatura internacional comprovando sua eficácia. No Brasil, os trabalhos dessa natureza ainda são incipientes, porém, demonstram eficiência em detectar alterações na proporção de contribuição das fontes na produção de sedimentos. Dentre as variáveis usadas por este método, estão alguns minerais, usados como traçadores de erosão do solo, devido a sua elevada estabilidade no ambiente e propriedade de magnetismo. No entanto, não é comum o uso da mineralogia aliada a modelos de predição de erosão do solo tão pouco na identificação de fontes de produção de sedimentos. O objetivo desse trabalho foi estimar a proporção de contribuição de dois conjuntos de fontes, estrada+canais+malha e superficial+subsuperficial, na produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. Para tanto, foram testados dois conjuntos de variáveis, pedogeoquímicas e pedogeoquímicas+mineralógicas para compor os modelos de predição. Para a identificação das fontes foi utilizado o método fingerprinting que compara os solos de diferentes fontes e os sedimentos que são encontrados em suspensão no canal de drenagem, usando variáveis traçadoras. Foi possível identificar a contribuição de cada um dos conjuntos de fontes de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, exceto para o ponto T1. Para esse ponto a escala foi determinante no resultado, pelo baixo número de amostras referentes a essa sub-bacia. As maiores contribuições na produção de sedimentos provem da erosão superficial do solo. A utilização de um único conjunto de variáveis para compor o modelo de identificação de fontes, suprimir variáveis que geravam incertezas, fez com que os resultados apresentados fossem mais coerentes e reduziu a variabilidade espacial e temporal da análise. As estradas se apresentam como fonte potencial de erosão na bacia. As adições de variáveis mineralógicas melhoraram os resultados, diminuindo os erros. No entanto, usando somente um único conjunto de variáveis para o modelo de predição não houve nenhuma mudança significativa nos resultados.

Palavras-chaves: fingerprinting, elementos traçadores, erosão hídrica, áreas de encosta, mineralogia.

ABSTRACT

Doctoral Thesis
Graduation Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

PEDOGEOCHEMICAL AND MINERALOGICAL VARIABLES IN THE IDENTIFICATION OF SOURCES OF SEDIMENTS IN A BASIN OF HILLSIDE.

Author: Pablo Miguel

Advisor: Ricardo Simão Diniz Dalmolin

Date and Place of Defense: Santa Maria, April 19, 2013.

Inadequate land use, ignoring its agricultural fitness can, in a short time, transform thousands of hectares in fragile systems highly susceptible to degradation processes. The use of the fingerprinting method in the identification of sediment sources has been efficient and there are many studies in the international literature proving its effectiveness. In Brazil, the studies in the matter are still incipient, but have demonstrated efficiency in detecting changes in the proportion of contribution of the sources in the production of sediments. Among the variables used in this method, there are some minerals that are used as tracers of soil erosion, due to their high stability in the environment and magnetism property. However, the use of mineralogy together with models of erosion prediction as well as in the identification of sources of sediment production is not common. The objective of this work was to estimate the proportion of contribution of two groups of sources, road+channels+grid and superficial+subsuperficial, in the production of sediments in a watershed slope. For this purpose, two groups of variables were tested, pedogeochemical and pedogeochemical+mineralogical to compose the prediction models. For the identification of the sources the fingerprinting method was used, which compares the soils of different sources and the sediments that are found in suspension in the drainage channel, using tracing variables. It was possible to identify the contribution of each one of the groups of sources of sediment production in the Vacacaí-Mirim River basin, except in the T1point. In this point the scale was determining in the result, due to the low number of samples of this sub-basin. The greatest contributions in the production of sediments came from superficial erosion of the soil. The use of an only group of variables to compose the model of identification of sources, suppressing variables that generate uncertainty, has led to more coherence in the presented results and reduced the space-time variability of the analysis. The roads were presented as a potential source of erosion in the basin. The adding of mineralogical variables improved the results, decreasing the errors. However, using only one group of variables for the prediction model did not lead to any significant change in the results.

Keywords: fingerprinting, tracer elements, erosion, hillside areas, mineralogy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. HIPÓTESE	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Solos de Encosta	16
3.2 Uso da terra	17
3.3 Modelagem da erosão e produção de sedimentos	20
3.3.1 Métodos indiretos	21
3.3.1.1 Métodos indiretos qualitativos	21
3.3.1.2 Métodos indiretos quali-quantitativos	22
3.3.2 Métodos diretos	22
3.4 Método fingerprinting de identificação de fontes de sedimentos	23
3.5 Contribuição da mineralogia	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 Caracterização da área em estudo	32
4.2 Coleta das amostras das fontes de sedimentos.	35
4.3 Coleta das amostras de sedimentos em suspensão	38
4.4 Análises físicas	39
4.5 Análises químicas	39
4.6 Análises mineralógicas	40
4.7 Análise termodiferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG)	42
4.8 Discriminação das fontes de sedimentos	43
4.9 Etapas da avaliação de contribuição das fontes	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 Primeira etapa – Abordagem Clássica Fingerprinting	48
5.1.1 Potencial discriminante das fontes – geoquímica.....	48
5.1.2 Classificação das amostras de sedimento em suspensão	56
5.1.3 Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica	60
5.1.4 Análise de Difração de Raios-X.....	62
5.1.5 Potencial discriminante das fontes – geoquímicas + mineralogia	64
5.1.6 Classificação das amostras de sedimento em suspensão	67
5.2 Segunda etapa – abordagem pedológica Fingerprinting	69
5.2.1 Pressuposições	69
5.2.2 Potencial discriminante das fontes	70
5.2.3 Classificação das amostras de sedimento em suspensão	74
6. CONCLUSÕES	77
7. REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

O uso da terra de maneira inadequada, fora dos preceitos da sustentabilidade e ignorando sua aptidão agrícola, em pouco tempo pode transformar milhares de hectares em sistemas frágeis altamente suscetíveis aos processos de degradação, alterando todo o equilíbrio dos sistemas naturais terrestres e aquáticos. No ambiente rural, onde encontram-se as lavouras, devem ser consideradas também a localização e quantidade de estradas, que construídas sem um planejamento adequado contribuem de maneira significativa na produção e transferência de sedimentos para os cursos de água, aumentando de maneira significativa a degradação ambiental.

Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura que envolvem hidrossedimentologia compreendem a interpretação de dados de produção de sedimentos em termos da magnitude de taxas de erosão e na qualidade da água. Nos últimos anos atenção especial tem sido dada a estudos de desenvolvimento, aplicação e aperfeiçoamento de métodos de identificação de fontes de sedimentos no ambiente de bacias hidrográficas.

Os canais fluviais recebem e transportam sedimentos provenientes de diversas fontes. Essas fontes contribuem de maneira muito variável, pois são afetadas por processos erosivos diferenciados que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica. A identificação e caracterização das fontes produtoras de sedimentos é fundamental para o entendimento de todo processo que envolve essa transferência de material, além de ser necessária para estabelecer ações no sentido de reduzir essa cargas de sedimentos.

O trabalho de Yu e Oldfield (1989) mostrou que cálculos quantitativos para estimativa da proporção das fontes que estão contribuindo para os sedimentos nos rios são mais úteis do que descrições puramente qualitativas. Esses autores desenvolveram um modelo estatístico multivariado para análise de propriedades dos sedimentos erodidos. Os sedimentos em suspensão são originados de diferentes fontes e carregam 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. Essa proporção, de

acordo com Minella et al. (2009a) é variável no tempo e no espaço, devido aos processos erosivos que estão ocorrendo na bacia de contribuição.

A utilização do *fingerprinting*, que é um método utilizado para identificação de fontes de sedimentos, tem se mostrado eficiente e há um grande número de trabalhos na literatura internacional comprovando sua eficácia. Trabalhos dessa natureza realizados no Brasil ainda são incipientes, porém, aqueles encontrados na literatura mostraram que o método *fingerprinting* foi eficiente em detectar alterações na proporção de contribuição das fontes na produção sedimentos devido a adoção de práticas conservacionistas diferenciadas em áreas de lavoura.

Para a eficácia de utilização do método, as variáveis, sejam elas, geoquímicas ou mineralógicas, precisam apresentar um grau significativo de conservatividade. Isto é, o sedimento em suspensão deve guardar na sua composição algumas características das fontes que o originaram. Elementos geoquímicos, principalmente os metais de transição, são conhecidos por apresentarem boa conservatividade no ambiente sendo por isso considerados bons traçadores.

Trabalhos encontrados da literatura têm usado alguns minerais, principalmente óxidos como marcadores ou traçadores de erosão do solo, devido a sua elevada estabilidade no ambiente e também devido a propriedade de magnetismo em determinadas espécies de óxidos. Outras características relacionadas com a presença de minerais distintos nos solos, como a cor, podem ser usadas para identificar processos erosivos e também a variabilidade espacial de materiais de origem em uma mesma área. No entanto, não é comum o uso da mineralogia aliada a modelos de predição de erosão do solo tão pouco na identificação de fontes de produção de sedimentos.

Ainda há pouca difusão de trabalhos que buscam usar variáveis mineralógicas quantitativas em modelos de predição de erosão do solo ou identificação de fontes de produção de sedimentos. Estudos que se apoiam em técnicas de análise de difratometria de raios-X (DRX), análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (TG) tem demonstrado que é possível a obtenção de variáveis mineralógicas quantitativas que podem ser usadas em tais modelos.

Face ao exposto, a proposta deste trabalho é avaliar a dinâmica do comportamento de variáveis pedogeoquímicas e mineralógicas de uma bacia

hidrográfica de encosta, típica da região do Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul, onde predominam solos rasos e agricultura menos intensiva no sistema familiar, na tentativa de identificar fontes de produção de sedimentos. Além disso, a bacia do presente estudo faz parte da área de captação do reservatório da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) que abastece aproximadamente 40% da água utilizada pela população da cidade de Santa Maria/RS.

2. HIPÓTESE

Bacias hidrográficas de elevada complexidade, como as encontradas no Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul, onde predominam solos rasos e grande variação geológica, podem ter suas fontes de produção de sedimentos identificadas com elevado grau de confiabilidade através do método fingerprinting. A adição de variáveis mineralógicas quantitativas ao modelo é capaz de aumentar a sua capacidade de predição.

2.1 Objetivo Geral

Identificar quais as fontes de produção de sedimentos que contribuem para o assoreamento do reservatório que abastece a cidade de Santa Maria, usando variáveis pedogeoquímicas e mineralógicas, através do método “fingerprinting”.

2.2 Objetivos específicos

Identificar alguns minerais que podem ser traçadores dos processos erosivos, facilitando a identificação pontual das fontes de sedimentos da bacia hidrográfica.

Determinar a influência das atividades antrópicas (principalmente quanto ao uso dos solos) na alteração dos processos sedimentológicos que ocorrem na bacia.

Caracterizar qualitativamente o sedimento e determinar sua inter-relação no processo de erosão do solo, avaliando a proporção e natureza dos constituintes minerais e orgânicos no sedimento.

Avaliar a relação que existe entre a mineralogia dos sedimentos que são gerados na bacia e os processos naturais e antrópicos que ocorrem na área.

Determinar quais fontes com maior impacto relativo na produção de sedimentos dentro da bacia, como estradas, canais fluviais, lavouras ou campo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Solos de Encosta

A fisiografia do estado do Rio Grande do Sul é muito variada. De acordo com Brasil (1973) existem 11 grandes regiões fisiográficas: Litoral, Depressão Central, Missões, Campanha, Serra do Sudeste, Encosta do Sudeste, Alto Uruguai, Campos de Cima da Serra, Planalto Médio, Encosta Inferior do Nordeste e Encosta Superior do Nordeste. A região entre a Depressão Central e o Planalto médio, de relevo complexo, é conhecida por Rebordo do Planalto, sendo uma região onde predominam solos rasos (PEDRON et al., 2009; MIGUEL et al., 2011; PEDRON et al., 2012) de baixo potencial agrícola e elevada fragilidade (SAMUEL-ROSA et al., 2011; MIGUEL, 2010; STÜRMER et al., 2009). Essas áreas são ocupadas por lavouras em regime de agricultura familiar. Pela peculiaridade com que se apresenta a distribuição dos solos nessa paisagem (solos de encosta), esses locais são objetos de estudos recentes trazendo uma intrigante gama de questões a serem elucidadas a respeito da sua gênese, comportamento, distribuição e uso.

Dentre os fatores preponderantes na formação dos solos de áreas de encosta, o relevo atua potencialmente na formação desses solos. Em locais mais planos, com drenagem deficiente ou com escoamento superficial pouco facilitado pelas condições de relevo, os solos são fortemente influenciados pelo hidromorfismo e por reações de oxidação e redução conferindo aos mesmos características morfológicas diferenciadas (MIGUEL et al., 2011).

Em bacias hidrográficas de encosta, fatores pedo-climáticos, como alta pluviometria, presença de solos rasos e fator relevo (declividade acentuada), podem aumentar significativamente a transferência de poluentes dos sistemas terrestres para os aquáticos (BORTOLUZZI et al., 2006). Esse é o caso da bacia hidrográfica do Arroio Lino (Agudo, RS) onde, de acordo com Dalmolin et al. (2003), o relevo é predominantemente forte ondulado a montanhoso com predomínio de solos rasos como Neossolos e Chernossolos. Outra bacia hidrográfica localizada em área de encosta, a bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, no município de Santa Maria, RS, apresenta, conforme Miguel et al. (2011), solos rasos (Neossolos Litólicos

predominantemente) que são encontrados em mais de 50% da área. Outras classes são encontradas em menor proporção como, Argissolos Vermelhos, e em locais com características de hifomorfismo, Planossolos Háplicos.

Além do relevo, a condição de material de origem é fator importante e condicionante no processo de formação do solo (PEDRON, 2007) e pode ser a chave para dúvidas em relação a formação e desenvolvimento dos solos em áreas de encosta. Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, Nascimento e Souza (2010) enfatizam que os solos possuem características com forte dependência do fator material de origem o qual é um importante condicionante da geomorfologia e da hidrologia. As formações sedimentares como os arenitos conferem textura arenosa ao solo, principalmente aqueles da Formação Botucatu, enquanto as formações vulcânicas conferem textura média ao solo, como os basaltos-andesitos.

Em estudo realizado na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, Miguel (2010), relata que áreas com maior desenvolvimento pedogenético em profundidade ocorrem na paisagem menos declivosa da encosta (rochas vulcânicas), algumas coxilhas (rochas sedimentares) e depósitos aluviais, mas com menor expressão territorial. Em substrato rochoso de origem vulcânica são encontrados Argissolos Vermelhos Alíticos típicos. Onde o material de origem é constituído por riólitos-riodacitos, os solos costumam apresentar menor desenvolvimento, predominando Neossolos Litólicos e Cambissolos Háplicos encontrados muitas vezes como associações de solos. Pelo material de origem riólitos-riodacitos possuir uma maior resistência ao intemperismo, são encontrados solos menos desenvolvidos nessas áreas, uma vez que o material possui maior teor de sílica. Em locais onde ocorre material de origem sedimentar como a Formação Caturrita, são encontrados, predominantemente Argissolos Bruno-Acinzentados Alíticos abruptos seguidos de Planossolos Háplicos Alíticos típicos.

3.2 Uso da terra

Uma bacia hidrográfica por apresentar características biogeofísicas e sociais integradas pode ser definida como uma unidade natural geográfica (SOUZA e FERNANDES, 2000). Portanto, se torna passível de ser estudada como unidade

básica de trabalho visando planejamentos de busca a adequabilidade da produção com a preservação ambiental. Fujihara (2002), afirma que as informações de solos e topografia são mais influentes nos critérios utilizados para predição dos riscos de erosão e capacidade de uso das terras, do que às de clima, geologia e geomorfologia. Sendo assim, sem a base de um levantamento de solos com um nível de detalhe significativo, as avaliações realizadas terão somente resultados superficiais da área estudada.

São inúmeras as bacias hidrográficas no Estado do Rio Grande do Sul que possuem atividade agrícola intensa (BORTOLUZZI et al. 2006). Assim ocorre um uso indiscriminado de insumos e falta de manejo adequado do solo, este sendo utilizado fora da sua aptidão agrícola ocasionando assim problemas de poluição ambiental (RHEINHEIMER et al., 2003).

Os solos intensamente cultivados na região Sul do Brasil, têm causado mudanças no equilíbrio dos recursos hídricos se tornando fontes de contaminação ambiental (BONUMÁ, 2011). Não havendo locais planos para o cultivo os agricultores desmatam terras íngremes e usam o sistema convencional de preparo de solo como base para o cultivo (PELLEGRINI et al., 2010). Áreas de encosta com práticas de manejo inadequadas têm como resultado rápida degradação dos recursos naturais (MERTEN e MINELLA, 2006) bem como, a alta taxa de uso de fertilizantes e pesticidas agrava o risco de contaminação para os recursos hídricos em bacias hidrográficas (KAISER et al., 2010). Sendo assim, a avaliação e estudo dos processos hidrológicos nesses locais são de extrema importância para um melhor aproveitamento e manutenção dos recursos hídricos (BONUMÁ, 2011).

Um exemplo dessa situação é a bacia hidrográfica do Arroio Lino (Agudo, RS) onde a declividade e os padrões de drenagem principalmente, juntamente com a agricultura mal manejada aumentaram o escoamento superficial e a erosão (SEQUINATTO, 2007). É estimado que as taxas de erosão para essa bacia onde sejam de 0,28 centímetros ha^{-1} ano, indicando uma insustentabilidade dos solos para as práticas de agricultura.

As terras da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim já tiveram uma intensa ocupação e usos mais diversificados algumas décadas atrás. Isso é evidente devido a grande quantidade e boa distribuição da rede viária encontrada ainda na área. Vários estudos relatam que não somente na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-

Mirim, mas como em toda a região do Rebordo do Planalto, o uso das terras foi cada vez menos intenso (SEMA/UFSM, 2001; DILL et al., 2004; POELKING, 2007; MIGUEL, 2010; SAMUEL-ROSA et al., 2011; DULLIUS, 2012; TEN CATEN et al., 2012). Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim o abandono das áreas de produção possibilitou uma etapa de regeneração da vegetação natural, sendo que atualmente, 60% dessa área é ocupada por florestas e vegetação secundária (SAMUEL-ROSA et al., 2011), apresentando um aumento nas áreas de Floresta (11%), de 1987 para 2009 (MIGUEL et al., 2011) além de um decréscimo em 8% nas áreas de lavoura neste mesmo período nesta mesma área.

Em áreas de encosta geralmente ocorre o predomínio de florestas em regiões de maior declividade, com associação direta a solos rasos (SAMUEL-ROSA et al., 2011; MIGUEL et al., 2011). Os locais ocupados por vegetação secundária como capoeira são encontrados nos mais diversos locais da paisagem. Os solos são em sua maioria menos pedregosos que nas áreas de floresta, apresentando profundidade semelhante (SAMUEL-ROSA et al., 2011), portanto, esses solos não se encontram em estágio avançado de degradação. Mesmo assim, essas áreas não possuem semelhança com as suas condições originais no que se refere a reserva de nutrientes e qualidade física do solo (MENEZES, 2008; ZALAMENA, 2008). Em muitos casos as áreas de floresta e capoeira são usadas para pastoreio bovino e equino. Assim, ocorre uma degradação da camada superficial do solo como, por exemplo, compactação e, além disso, a regeneração natural é comprometida (HACK et al., 2005). Além desses locais, o pastoreio de animais também é feito em áreas de solos mais profundos e menos pedregosos e são usados principalmente com pecuária extensiva (SAMUEL-ROSA et al., 2011).

Samuel-Rosa et al. (2011) citam e definem outros usos da terra característicos de áreas de encosta. Os autores divide as áreas de campo em campo sujo (pastagens naturais mal manejadas, com predomínio de vegetação de porte herbáceo-arbustivo) e campo limpo (pastagens naturais e perenes bem manejadas). Outros dois usos em menor escala são a agricultura e a silvicultura. As áreas de lavoura geralmente se encontram distribuídas por toda a área em locais de menor declividade e solos mais profundos. As áreas com silvicultura, com predomínio de Eucalipto, também ocupam condições de relevo e solo semelhantes com a agricultura.

Finalmente, a ocupação urbana também faz parte das áreas de encosta. Geralmente as ocupações são compostas por pequenas propriedades e sítios de final de semana (GOLDANI e CASSOL, 2008), muitos dos quais construídos em locais inapropriados, como margens dos corpos de água e áreas de forte declividade. A partir dessa ocupação que são gerados problemas sérios em relação a esse tipo de uso da terra. Quando o processo não tem um planejamento e é desordenado, pode ocorrer a construção de obras em locais inapropriados e conseqüentemente uma contribuição de carga de sedimentos recebida pelos canais fluviais (PAIVA et al., 2001; DILL et al., 2004) além de resíduos domésticos e cloacais despejados nos cursos de água devido à falta de coleta e tratamento (GOLDANI e CASSOL, 2008).

3.3 Modelagem da erosão e produção de sedimentos

Modelos podem ser classificados de acordo com os seus parâmetros de entradas, ou seja, as variáveis que são utilizadas, ou pelas relações estatísticas e conjunto de fórmulas que são utilizados pelos mesmos. Modelos chamados de empíricos têm os parâmetros das equações obtidos por calibração em parcelas experimentais. Segundo Minella et al. (2010) esses modelos necessitam de um pequeno número de variáveis em comparação com os modelos determinísticos, sendo úteis na identificação das áreas críticas de erosão.

Os modelos conceituais não possuem somente um conjunto de fórmulas, que representam o sistema de modo simplificado, mas possuem um conjunto de componentes interligados (RODRIGUES, 2011). Esses modelos incorporam mecanismos de geração e de transferência de sedimentos, incluindo assim, uma descrição dos processos na bacia hidrográfica. Assim, esses modelos permitem a entrada de dados sobre a variabilidade espacial e temporal, mesmo que com pouco detalhamento (MINELLA et al., 2010).

Para os modelos de base física, é necessária a estimativa dos parâmetros para a solução de equações. Isso pode ser um fator limitante quando a estimativa precisa ser feita em áreas extensas e heterogêneas, onde o nível de detalhamento é baixo ou inexistente (MINELLA et al., 2010; PETAN et al., 2010). Embora seja

evidente a necessidade de informações sobre as fontes de sedimentos, a sua obtenção permanece sendo muito onerosa e de difícil acesso. A identificação de fontes de sedimentos pode ser feita por métodos indiretos ou diretos (MINELLA, 2003).

3.3.1 Métodos indiretos

Os métodos tradicionais para avaliação da importância relativa individual das fontes empregam métodos com abordagem indireta. Essa abordagem envolve observações visuais ou medidas de atividade erosiva, que são por sua vez usadas para inferir a importância relativa de diferentes fontes potenciais. Assim, fotografias aéreas podem providenciar evidências da incidência de erosão de canal, voçorocas e talvez erosão superficial e de córrego, bem como parcelas de erosão podem ser utilizadas para determinar taxas de perdas de solo de fontes superficiais. Contudo, essa abordagem indireta tem muitos problemas.

Os métodos indiretos estão baseados na utilização de modelos empíricos ou de base física para determinar a localização das fontes de sedimentos. Eles podem ser divididos ainda em qualitativos e quali-quantitativos.

3.3.1.1 Métodos indiretos qualitativos

Os métodos indiretos qualitativos possuem características como uma abordagem geo-bio-hidrológica através da aplicação de modelo hidrológico (TOPMODEL) para identificar e quantificar as áreas hidrológicamente sensíveis (zonas saturadas e áreas de afluência variável). Outra maneira é a aplicação de um modelo geomorfológico (UMBRAL) para identificar em uma escala espacial e temporal os diferentes processos erosivos, usando para isso propriedades hidráulicas e mecânicas do solo, características de relevo e dos processos hidrológicos (SANTOS, 2001), avaliação e ranqueamento das áreas com maior ocorrência na produção de sedimentos (COLEMAN e SCATENA, 1986), estimativa das diferentes razões de emissão de sedimentos e da produção total relativa de sedimentos a partir de evidências do processo erosivo (NELSON e BOOTH, 2002).

3.3.1.2 Métodos indiretos quali-quantitativos

Já os métodos indiretos quali-quantitativos são baseados na utilização de modelos matemáticos espacialmente distribuídos que estimam erosão bruta nas vertentes e a descarga sólida no exutório da bacia, culminando na razão entre a produção de sedimento e a erosão bruta. A modelagem da erosão bruta utiliza principalmente modelos matemáticos de base empírica, derivados de aproximações da Universal Soil Loss Equation (USLE).

3.3.2 Métodos diretos

Os métodos diretos de estimativa de produção de sedimento baseiam-se no fato de que as características físico-químicas dos sedimentos erodidos de determinada bacia hidrográfica guardam relação com as características dos sedimentos produzidos nas principais fontes de origem. Eles podem ser aplicados empregando substâncias ou características traçantes naturais (passivas), como cor (MARTÍNEZ-CARRERAS et al., 2010a; MARTÍNEZ-CARRERAS et al., 2010b), suscetibilidade magnética (YU e OLDFIELD, 1989; CAITCHEON, 1993; GRIMLEY, 2000; GUZMÁN et al., 2010), mineralogia (KLAGES et al., 1973; WALL e WILDING, 1976) e composição geoquímica (BIRD et al., 2010; BALLANTINE et al., 2009; CUI et al., 2010), ou mesmo utilizando elementos artificiais (propriedades ativas), como os radionucleotídeos ^{137}Cs , ^7Be e ^{210}Pb (DU et al., 2010; ESTRANY et al., 2010). Esses métodos somente podem ser utilizados com elementos traços ou características que apresentem diferenças significativas na sua concentração entre as fontes a serem identificadas, e que sejam conservativas durante os processos de remoção e de transporte dos materiais das fontes até a calha do rio (MINELLA e MERTEN, 2011).

O uso individual dessas propriedades tem fornecido informações valiosas sobre a dinâmica de produção de sedimentos, principalmente em pequenas bacias hidrográficas. Contudo, a resolução quantitativa de múltiplas fontes pode somente ser alcançada usando assinaturas compostas (fingerprints) envolvendo vários traçadores considerados estatisticamente diferentes (YU e OLDFIELD, 1989).

3.4 Método fingerprinting de identificação de fontes de sedimentos

Dentre os tipos de erosão identificados, a erosão hídrica é a principal responsável pela redução da capacidade produtiva dos solos bem como assoreamento dos corpos d'água e poluição dos mesmos. Várias são as fontes de erosão do solo ou de produção de sedimentos encontrados dentro de uma bacia hidrográfica. Os focos podem ser observados nos mais diversos locais, predominando em lavouras, estradas e canais fluviais (MINELLA e MERTEN, 2011), sendo de difícil detecção na calha dos rios. A identificação das diferentes fontes que formam a mistura dos sedimentos em suspensão possibilita a validação de modelos matemáticos distribuídos de produção de sedimentos (MINELLA et al., 2007; WALLING et al., 2003).

A busca por ferramentas que auxiliassem na identificação de fontes de produção de sedimentos (MINELLA e MERTEN, 2011) iniciou na década de 70 com trabalhos que buscavam a obtenção de traçadores através dos estudos de propriedades eletromagnéticas presentes nos sedimentos. Porém, nesse primeiro momento, os estudos eram em caráter qualitativo. A partir de trabalho realizado por Collins e Walling (2002) que se buscou aprofundar as pesquisas em relação a identificação de parâmetros que pudessem identificar propriedades traçadoras nos solos e sedimentos como mineralogia, magnetismo, parâmetros geoquímicos, orgânicos, radiômetros, isótopos e físicos, juntamente com ferramentas estatísticas e modelagem numérica. Segundo Horowitz (1991), os traçadores considerados geoquímicos apresentam vantagem por serem facilmente determinados por métodos de análise de rotina de laboratório por exemplo.

Os trabalhos realizados por Yu e Oldfield (1989) contribuíram como método quantitativo através do desenvolvimento da aplicação de estatística multivariada para análise das propriedades dos sedimentos. Esses autores utilizaram características quantitativas para a identificação das fontes que contribuíam para os sedimentos presentes nos rios.

Um método que tem se mostrado eficiente na identificação de fontes de produção de sedimentos é o método fingerprinting (WALLING, 2005). Esse método se baseia na premissa de que sedimentos provenientes de diferentes fontes apresentam características geoquímicas diferentes. Assim, é possível traçar a

origem dos sedimentos e a proporção com que cada fonte contribui através da avaliação de suas características geoquímicas. Conforme COLLINS e WALLING (2002) a determinação da variabilidade espacial e temporal das fontes bem como a seleção de variáveis que possuem características traçadoras desse sedimento é importante visto a complexidade das diferentes bacias hidrográficas.

Estudos iniciais buscaram identificar fontes de sedimentos em bacias hidrográficas de grande extensão. Walling e Woodward (1995) identificaram fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de 276 km² no Reino Unido. Esses autores utilizaram variáveis traçadoras como radionucleotídeos, propriedades magnéticas dos minerais e elementos orgânicos. As fontes analisadas foram áreas de lavoura e pastagem, provenientes de materiais de três épocas geológicas e canais fluviais. Testando a eficácia do método de identificação, os autores puderam mostrar que foi possível identificar as alterações na contribuição relativa das fontes. Tendo por base a geologia e a proporção do uso do solo em cada feição geológica, as contribuições foram: Cretáceo de 19,8% (onde 9,2% eram pastagens e áreas cultivadas 10,6%), Triássico 41,8% (onde 12,3% eram pastagens e áreas cultivadas 29,5 %), Permiano 26,4 % (onde 6,7% eram pastagens e áreas cultivadas 19,7%) e canais fluviais onde a contribuição foi de 12,0%. Quando o trabalho é realizado em grandes bacias é importante considerar fatores naturais ou antrópicos que irão determinar as diferenças entre a composição química dos sedimentos bem como as diferenças químicas e mineralógicas dos diferentes materiais de origem.

Estudos de identificação de fontes de produção de sedimentos relacionados a melhorias nas práticas de manejo do solo também tem sido realizados. Minella et al. (2008) avaliaram as alterações na magnitude das taxas de erosão do solo com implementação de práticas de manejo melhoradas. Os autores verificaram que para os períodos pré e pós-implementação das práticas conservacionistas, ocorreu uma diminuição da contribuição das lavouras e estradas de 62% e 36% para 54% e 24%, respectivamente, enquanto a contribuição dos canais de drenagem aumentou de 2% para 22%. Nesse trabalho fica evidente a importância de estudos da dinâmica que há entre as fontes e não somente a avaliação das técnicas de identificação de fontes de sedimentos ou de processos de monitoramento hidrossedimentométrico separadamente. O estudo dos impactos das melhorias nas práticas de manejo bem como gestão da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica representam

uma importante ferramenta para se obter estratégias no monitoramento dos processos erosivos mesmo que em um curto período de monitoramento (MINELLA et al., 2009b). Os estudos de monitoramento precisam ainda dar importância para a variabilidade climática natural e eventos isolados de grande magnitude.

Vários trabalhos citam a relevância em relação a identificação de fontes de produção de sedimentos. Exemplo de aplicação bem sucedida desse método é citado por Collins et al. (1997), onde os autores obtiveram bons resultados do método de identificação os quais determinaram a variabilidade das fontes de sedimentos em duas bacias hidrográficas do Rio Exe (601 km²) e Severn (4325 km²) no Reino Unido. As fontes avaliadas foram das áreas de cultivo, pastagens, florestas e erosão na rede fluvial. Já em trabalho realizado por Russel et al. (2001) o método foi aplicado em duas bacias do Reino Unido, na bacia Rosemaund com 1,5 km² de extensão e na bacia Smisby com 2,6 km². Nessas bacias os sedimentos transportados em suspensão apresentavam como fonte de origem a erosão laminar nas lavouras (34% para Rosemaund e 65% para Smisby), erosão nos drenos (27% para Rosemaund e 55% para Smisby) e erosão na rede fluvial (menos de 10%).

Na identificação de fontes de produção de sedimentos é importante encontrar um elemento químico ou uma variável que apresente propriedades traçadoras desejáveis como, por exemplo, estabilidade e capacidade discriminante. Diversos trabalhos mostram testes em busca de variáveis que possam ser facilmente determinadas por meio de análises químicas e que o seu conjunto forneça resultados viáveis.

A utilização de radionucleotídeos ambientais tem sido mostrada como uma forma eficaz para estudos de erosão e deposição dentro de uma paisagem (ZAPATA, 2003; HANCOCK et al., 2013). O ¹³⁷Cs, ⁷Be e ²¹⁰Pb podem fornecer informações de médio prazo (~ 50 anos) e longo prazo (~ período 150 anos). Segundo Hancock et al. (2013) quando estes isótopos atingirem a superfície do solo eles são fortemente adsorvidos à fração argila do solo através de processos biológicos e químicos sendo poucos afetados por processos físicos. Barnard et al. (2013) estudaram as fontes de origem de sedimentos na baía de San Francisco, Califórnia (EUA), usando algumas variáveis baseadas em características da área como geologia. Usando uma amostragem de sedimentos, análises mineralógicas e geoquímicas, mapeamento de batimetria, processos físicos e modelagem numérica,

os autores desenvolveram um método para integrar e validar os resultados de algumas técnicas para estabelecer a origem dos sedimentos da bacia. Entre as variáveis analisadas estão, morfometria do tamanho de grão, taxas dos isótopos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, metais pesados, difração de raios-X semi-quantitativa, constituintes biológicos e antropogênicos e vulcânicos. Bernárdez et al. (2012) incorporaram variáveis como tamanho de grão, carbono total, carbono orgânico particulado e inorgânico, nitrogênio orgânico particulado, difração de raios X, metais pesados, para determinar a origem de sedimentos marinhos da costa do noroeste da Península Ibérica.

O estudo da deposição de cinzas vulcânicas também pode ser usado para avaliar origem do transporte de sedimentos de uma área. Olson et al. (2013) usaram o tempo de deposição de cinzas vulcânicas e ^{137}Cs para determinar a quantidade de erosão do solo e a taxa de erosão no Vale do Rio Spoon em Illinois (EUA). O método que utilizou cinzas vulcânicas avaliou as taxas de erosão do solo para os últimos 100 anos e o método utilizado como ^{137}Cs para os últimos 50 anos. A diferença entre a quantidade total de erosão do solo para os dois métodos resultou na estimativa da quantidade total de erosão em 50 anos (período entre 1910 e 1960) que depois dividido por 50 fornece a taxa de erosão anual. As taxas anuais de erosão para 6 posições da paisagem (planície, pedimento, encosta, ombro e interflúvio) variaram de 2 a 51 $\text{Mt ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$.

Segundo Henshaw et al. (2012), a erosão em canal muitas vezes constitui uma proporção substancial do montante total de sedimentos transportados por rios. Em estudo realizado na bacia hidrográfica experimental de Pontbren, Reino Unido, os autores concluíram que as variações espaço-temporal nas taxas de produção de sedimentos em canais estão associadas as condições de gestão de uso da terra e ainda que a importância da erosão em canais como fontes de sedimentos pode ser ainda mais significativa em ambientes mais sensíveis. Walling e Collins (2005) também chamam a atenção para a importância da erosão em canais nos rios ingleses. Os autores relatam que as fontes de canais são responsáveis por taxas que se encontram entre 5 e 15% dos sedimentos em suspensão, e esta contribuição pode ser superior a 40% em um número significativo de bacias hidrográficas.

Em uma bacia hidrográfica de pequena extensão ($1,19\text{km}^2$) no Sul do Brasil, Minella et al. (2009a) utilizando o método fingerprinting, encontraram uma solução

coerente avaliando como fontes de produção de sedimentos lavouras e estradas. O trabalho demonstra uma importância significativa das lavouras (64%) e das estradas (36%) na produção de sedimentos, bem como a ocorrência de uma variação temporal na produção de sedimentos através da cobertura vegetal da bacia e de obras de manutenção das estradas.

Em trabalho realizado por Collins et al. (2010) na bacia do Rio Piddle (~100 km²), no sul da Inglaterra, usando o método fingerprinting, os autores concluíram que a erosão em estradas de fazendas não pavimentadas é uma fonte potencial de produção de sedimentos. Foram avaliadas fontes como pastagem, lavoura, estradas e canais fluviais. As médias encontradas para o período de avaliação em três sub-bacias estudadas variaram entre 1 e 19% para estradas, 31 e 55% para pastagens, 1 e 19% para lavouras e 23 e 49% para canais.

Collins et al. (2012), estudando uma bacia na parte superior do Rio Kennet (214 km²) no sul da Inglaterra, acoplaram o método fingerprinting na identificação de fontes de produção de sedimentos através do uso de um algoritmo genérico, análise da função discriminante, teste de médias não-paramétrico Kruskal-Wallis e Análise de Componentes Principais. O trabalho mostrou uma nova abordagem para o método de identificação de fontes através de assinaturas, os fingerprinting, e essa combinação proporcionou a extração máxima do conjunto de variáveis. As contribuições das fontes foram de 4% para solos agrícolas, 55% para estradas agrícolas não cascalhadas, 6% para a beira de estradas danificadas, 31% para canais fluviais e 4% para área urbana. Os autores apontam ainda para a importância da avaliação das taxas de erosão de origem agrícola, principalmente nas estradas do interior de fazendas.

3.5 Contribuição da mineralogia

Os estudos de erosão do solo apoiados em características mineralógicas tangenciam o uso de variáveis quantitativas para avaliar ou determinar a origem dos processos erosivos. As pesquisas se baseiam quase que na sua totalidade em usar características que possam auxiliar no entendimento da dinâmica dos processos erosivos, como magnetismo (CAITCHEON, 1993; VENTURA et al., 2002; GUZMÁN

et al., 2010) e cor (MARTÍNEZ-CARRERAS et al., 2010a; MARTÍNEZ-CARRERAS et al., 2010b). O uso de variáveis mineralógicas quantitativas em modelagem da erosão do solo ainda é um assunto que se apresenta incipiente em termos de utilização.

Segundo Minella e Merten (2011), a obtenção de diferenças nos traçadores é obtida em função do manejo do solo, da profundidade do fenômeno erosivo e umidade do terreno, os quais determinam diferenças nas características dos solos e conseqüentemente dos sedimentos erodidos. Sendo assim, deve-se considerar a estabilidade da variável no ambiente, a qual é uma premissa fundamental dos traçadores. Portanto, é possível afirmar que os minerais, através de sua quantificação ou mesmo avaliação de outras características, como por exemplo, relacionadas a sua cristalinidade, podem se comportar como bons traçadores da erosão do solo, bem como adicionar a modelos de predição variáveis que aumentariam a robustez desses modelos. Segundo Caitcheon (1993), as propriedades dos minerais em sedimentos, principalmente magnéticas, tendem a serem misturadas uniformemente, apresentando relações lineares entre os parâmetros magnéticos ambientais. O autor ainda cita que por estas relações serem, espacialmente e temporalmente estáveis no ambiente, esses minerais devem ser capazes de distinguir as fontes de produção de sedimentos.

Um dos primeiros estudos que buscou avaliar características dos minerais para explicar alguns processos erosivos foi desenvolvido por Caitcheon (1993). O trabalho buscou desenvolver um método para detecção espacial de sedimentos fluviais, usando o magnetismo dos minerais, tendo por base a sua estabilidade no ambiente levando em consideração as características do material de origem e solos da bacia hidrográfica. Através de uma abordagem estatística baseada nas características magnéticas dos minerais o trabalho de Caitcheon (1993) identificou e quantificou as contribuições dos principais tributários do Rio Ord na Austrália.

Outra forma de avaliação da origem da erosão do solo é o uso de minerais magnéticos sintéticos obtidos comercialmente. Guzmán et al. (2010), estudaram o uso de traçador magnético (óxido de ferro - Fe_3O_4) comercialmente disponível como Bayferrox® 318 M, através de chuva simulada em parcelas experimentais. Os autores concluíram que a mistura do traçador ao solo resultou em uma uniforme ligação a agregados, o que possibilitou a determinação no solo erodido e que o

traçador pode ser uma ferramenta útil em estudos de erosão do solo, visto que, uma das vantagens é a facilidade da determinação da suscetibilidade magnética do mesmo.

Ventura et al. (2001) desenvolveram um traçador de erosão do solo constituído por partículas magnetizadas, feitas de esferas de poliestireno, incorporadas com pó de magnetita. O marcador magnético final apresenta um tamanho e densidade semelhantes a agregados do solo. Quando misturado com o solo em uma dada razão e submetido à chuva simulada, o marcador se movimenta juntamente com as partículas de solo podendo assim ser possível o seu rastreamento. Ventura et al. (2002) utilizaram essa metodologia permitindo avaliar a redistribuição temporal de sedimentos durante o processo de erosão. Em experimento conduzido na Fazenda Throckmorton na Purdue University, os autores introduziram o marcador a uma profundidade de 3 cm com 5% de concentração em parcelas experimentais de chuva simulada. O trabalho mostrou que os locais de desagregação e deposição foram claramente identificados através do auxílio da técnica de suscetibilidade magnética.

Estudos sedimentológicos com base em propriedades magnéticas dos minerais e difração de raios-X (DRX) foram realizados por Kim et al. (2013). Os autores identificaram grupos distintos de sedimentos que se diferenciavam magneticamente. Através do estudo da produção de sedimentos em dois dos principais rios da China, o Rio Yangtze e o Rio Amarelo, foi possível definir grupos distintos de sedimentos através de análise estatística multivariada, com base em variáveis granulométrica e mineralógicas, e identificar as fontes potenciais de produção de sedimentos na área de estudo. Também em estudo realizado no Rio Yangtze na China, He et al. (2012) utilizaram análise de difração de raios-X (DRX), para a identificação de quais tributários do Rio Yangtze exerciam maior influência na contribuição dos sedimentos que chegavam até a calha do rio. Avaliando a composição mineral da fração argila dos sedimentos, os autores identificaram que os minerais mais abundantes no sedimento do rio foram illita, esmectita, clorita e caulinita. A composição mineral da fração argila do rio Yangtze exibiu um padrão semelhante ao longo da corrente principal, mas diferente nos tributários. A diferença destes afluentes esta relacionada a heterogeneidade geológica e da intensidade de intemperismo. Os autores chamam a atenção para o estudo dos padrões

mineralógicos dos sedimentos em suspensão presentes na calha dos rios, visto que esses possuem diferenças significativas e podem assumir o papel de traçadores da erosão do solo, fato que ainda é pouco explorado nos estudos de identificação de fontes de produção de sedimentos.

O uso do método fingerprinting associado a variáveis mineralógicas é descrito em trabalho realizado por Martínez-Carreras et al. (2010a), através da avaliação de parâmetros da cor do solo e sedimentos. O estudo foi realizado na bacia do Rio Attert em Luxemburgo, onde parâmetros de cor foram medidos em fontes potenciais de sedimentos em suspensão (tipos de usos da terra – lavoura, campo e floresta - e canais fluviais) de sete sub-bacias que variam em tamanho de 0,7 - 247 km². Vinte e quatro parâmetros de cor foram obtidos a partir de vários modelos (CIE xyY, CIE XYZ, RGB, Munsell HVC, Helmholtz cromaticidade, CIELUV e CIELAB). Os autores concluíram que, embora a cor seja capaz de distinguir fontes potenciais de sedimentos em pequenas bacias (< 4,5 Km²), o nível de discriminação diminui a medida que aumenta o tamanho de captação, provavelmente devido à geologia heterogênea e pedologia, a variabilidade intra-fonte e sobreposição de origem. No entanto, nas bacias médias estudadas (19,4- 247 km²), a cor pode diferenciar entre solo superficial e sub-superficial (canais fluviais). Uma contribuição importante para o método fingerprinting deste estudo é que, embora os parâmetros de cor não sejam capazes de discriminar a variabilidade de tipos de usos da terra e de canais fluviais em bacias de médio porte, eles oferecem informações substanciais que poderiam ser integradas na abordagem clássica do fingerprinting em conjunto com outros constituintes (por exemplo, geoquímica, radionuclídeos e/ou compostos orgânicos).

Uma comparação do método fingerprinting levando em consideração a sua abordagem clássica e o uso de parâmetros de cor foi realizado por Martínez-Carreras et al. (2010b). O estudo foi realizado em três sub-bacias do Rio Attert, em Luxemburgo, Weierbach (0,7 km²), Huewelerbach (2.7 km²), e Wollefsbach (4,4 km²). Os resultados mostraram que a floresta e canais fluviais foram as principais fontes de produção de sedimentos na sub-bacia Weierbach, floresta e pastagens foram as principais fontes na sub-bacia Huewelerbach, e que pastagens foi a principal fonte na sub-bacia Wollefsbach. Os autores relatam que a capacidade de parâmetros de cor para discriminar fontes de sedimentos é menor em bacias onde a variabilidade de cor inter-fonte é baixa, e/ou onde existe um maior número de fontes

potenciais. Neste último caso, devem-se combinar variáveis geoquímicas com parâmetros de cor, podendo assim, aumentar a dimensionalidade dos conjuntos de dados para as bacias hidrográficas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área em estudo

A área de estudo abrange uma área de aproximadamente 20 km² da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim (Figura 1), localizada no Rebordo do Planalto Sul (W53°35' / W54°00' e S29°32' / S29°40') ocupando parte dos municípios de Santa Maria e Itaara.

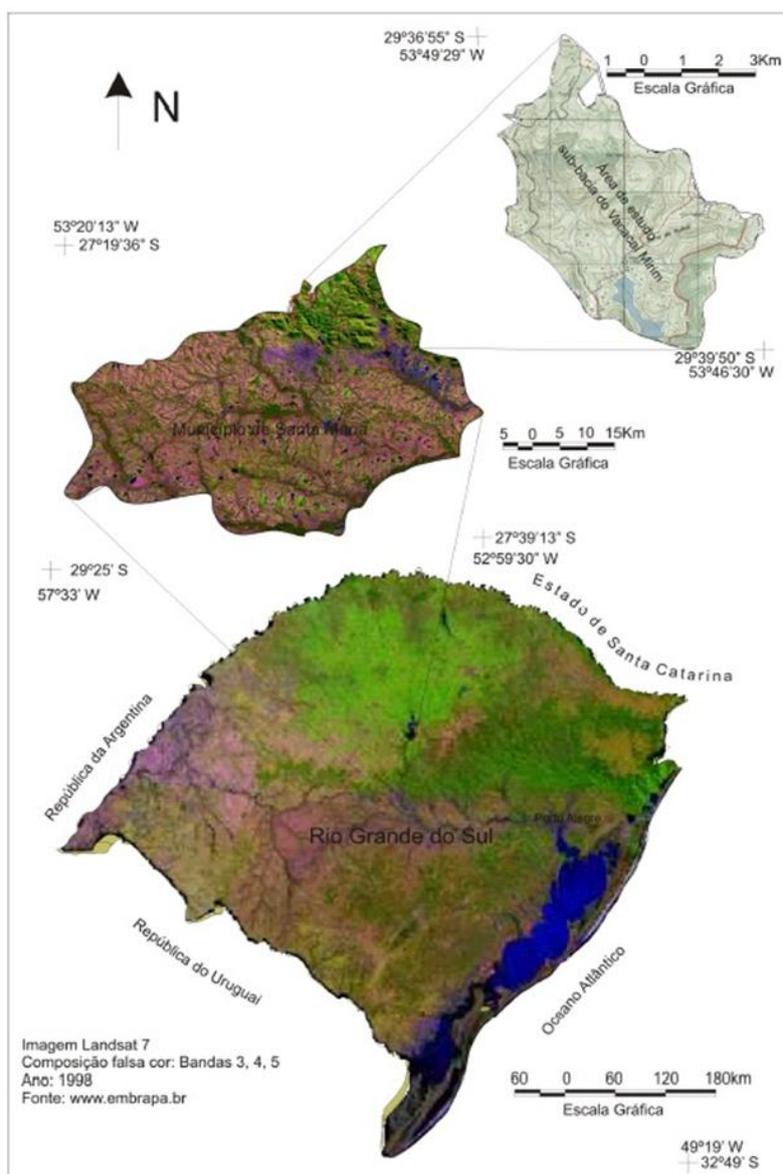


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, Santa Maria, RS. (Adaptado de Goldani e Cassol, 2008)

As normais climatológicas apontam para um regime pluvial anual médio de 1616,8 mm e temperatura média anual de 18,8 °C (Tabela 1).

Tabela 1. Normais climatológicas de precipitação (1961 a 1990), precipitação para o ano de 2011 e temperatura média para Santa Maria/RS.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Normais ⁽¹⁾	163,0	127,2	136,2	121,4	127,5	139,3	144,9	142,1	124,3	128,2	120,5	142,2
2011 ⁽²⁾	68,8	135,4	151,1	108,7	138,2	33,2	70,4	74,5	177,5	245,0	72,8	274,9
Temp ⁽³⁾	24,2	23,9	21,9	18,4	15,9	13,9	14,1	14,2	16,5	18,6	21,0	23,3

⁽¹⁾ médias das precipitações totais referentes a cada mês para a série histórica de dados em mm. ⁽²⁾ médias das precipitações totais para os meses do ano de 2012 em mm. ⁽³⁾ Temperatura média de cada mês para a série histórica de dados em °C.

Fonte: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>.

A água captada pela bacia através de sua drenagem principal, o Rio Vacacaí-Mirim, abastece o reservatório da Companhia Rio-Grandense de Saneamento (CORSAN), que é responsável por parte do abastecimento de água da cidade de Santa Maria. Ao norte da área, em altitudes mais elevadas, estão localizadas as nascentes (FERREIRA et al., 2009) onde ocorre o predomínio de rochas vulcânicas e solos mais desenvolvidos. De acordo com Ruhoff et al. (2003), a vegetação é formada por floresta subtropical, latifoliada de espécies semi-caducifólias, encontradas ao longo dos vales, em regiões de grande declividade, formações campestres, campos cobertos por gramíneas contínuas, entremeadas de subarbustos isolados e formações especiais correspondentes às matas de galeria e vegetação ribeirinha.

A bacia hidrográfica se caracteriza por diferentes usos da terra, classes de solo, relevo acidentado e geologia bastante complexa (Figura 2). Mais da metade da área tem ocupação do solo com floresta nativa seguida de áreas de campo nativo e capoeira, lavouras anuais, silvicultura (Eucalipto) e área urbanizada (SAMUEL-ROSA et al., 2011). Em mais de 50% da área são encontrados solos pouco desenvolvidos, Neossolos Litólicos, geralmente em locais de maior declividade. Nas áreas localizadas mais ao norte da bacia de captação são encontrados solos mais profundos, como Argissolos Vermelhos, numa proporção de 12%, e em locais com características de hifromorfismo, Planossolos Háplicos, pouco expressivos, com participação de 1,6% da área (MIGUEL, 2010; MIGUEL et al., 2011) (anexo 1).

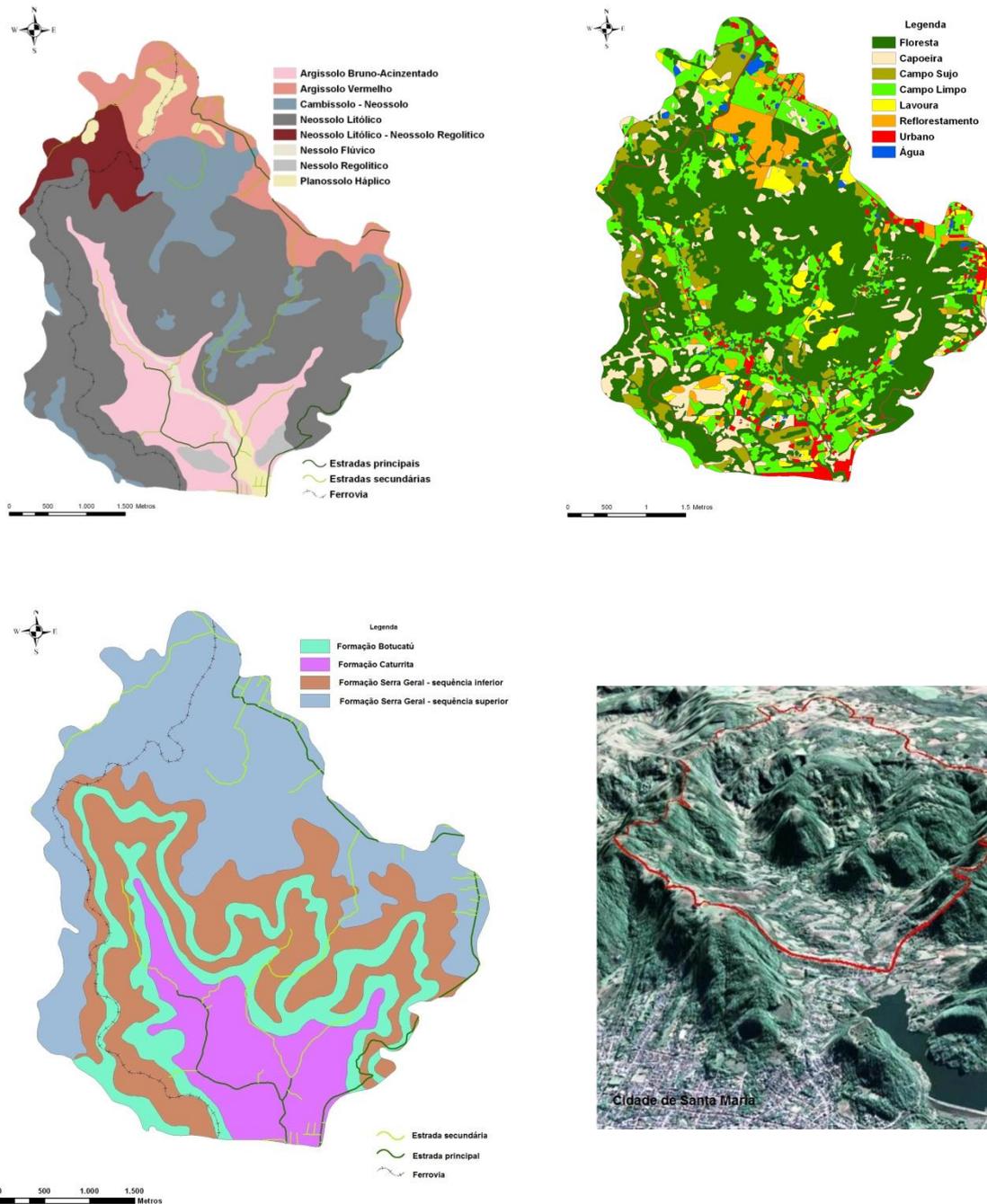


Figura 2. Mapa pedológico (MIGUEL et al., 2011), mapa de uso da terra de 2008/2009 (SAMUEL-ROSA et al., 2011), mapa geológico (MACIEL FILHO, 1990) e ilustração do relevo da área.

A geologia da área é constituída por três formações geológicas, além de depósitos coluvionares e de aluvião do Quaternário (SARTORI, 2009). Na base da seqüência estratigráfica, em elevações abaixo de ± 200 m, ocorre a Formação Caturrita, constituída por material sedimentar depositado em ambiente aluvial,

constituída por siltito argiloso vermelho e por arenito avermelhado de granulometria fina à média. Em elevações entre ± 200 m e ± 350 m ocorre a Sequência Inferior da Formação Serra Geral (basaltos-andesitos tholeíticos). As rochas básicas são de coloração cinza-escura e são constituídas por plagioclásio cálcico, clinopiroxênio e magnetita. Em elevações superiores a ± 350 m ocorre a Sequência Superior da Formação Serra Geral (vitrófilos, riólitos-riodacitos granofíricos). As rochas ácidas apresentam cor cinza-clara constituídas por plagioclásios, clinopiroxênios, hornblenda uralítica e magnetita. O arenito eólico constituinte da Formação Botucatu ocorre tanto assentado sobre a Formação Caturrita, como no interior da Formação Serra Geral (arenito intertrapp), possuindo característica de um arenito quartzoso de granulometria fina à média, contendo feldspato alterado e cimentado por sílica ou por óxido de ferro, que lhe confere a coloração rosa-avermelhada (SARTORI, 2009).

4.2 Coleta das amostras das fontes de sedimentos.

As fontes de produção de sedimentos analisadas na área foram estradas, canais fluviais e amostras dos primeiros 20 cm do horizonte A (Tabela 2), esta última definida como “malha”, abrangendo os diferentes usos da terra, classes de solos e geologia encontrados na área de estudo. Em um segundo momento fez-se avaliação usando amostras contemplando uma fonte superficial (malha) e uma fonte subsuperficial (estradas + canais) (Figura 3).

Nesse estudo utilizou-se informações de amostras (0 – 20 cm) advindas de 340 pontos de coleta (Miguel, 2010; Samuel-Rosa, 2012). Sabe-se, contudo que os processos erosivos ocorrem potencialmente nos primeiros 5 cm da superfície do solo. Para cada local de coleta de sedimento em suspensão, o que corresponde a uma subdivisão da bacia (sub-bacia), foram coletadas no mínimo 6 amostras de cada fonte. Para a composição de uma dessas amostras foram coletadas 10 sub-amostras. Para isso, foi considerada a geologia da área de estudo (MACIEL FILHO, 1990), as classes de solos (PEDRON, 2005; POELKING, 2007; MIGUEL, 2010) e os levantamentos de identificação de usos da terra e de processos erosivos predominantes (MIGUEL, 2010; MIGUEL et al., 2011; SAMUEL-ROSA et al., 2011).

Tabela 2. Caracterização das amostras usadas para a fonte de produção de sedimentos “malha”.

Amostra ⁽¹⁾	Uso da terra ⁽²⁾	Classe de Solo ⁽³⁾	Geologia ⁽⁴⁾
T1 227	Campo sujo	Neossolo Litólico	Sedimentar
T1 229	Floresta nativa	Neossolo Litólico	Sedimentar
T1 230	Campo limpo	Neossolo Litólico	Sedimentar
T1 268	Lavoura	Neossolo Litólico	Vulcânica
T1 269	Campo sujo	Neossolo Litólico	Vulcânica
T1 270	Floresta nativa	Neossolo Litólico	Vulcânica
T1 277	Lavoura	Cambissolo Háplico	Sedimentar
T2 131	Campo limpo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T2 139	Vegetação secundária	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T2 169	Campo limpo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T2 228	Campo limpo	Neossolo Litólico	Sedimentar
T2 245	Campo limpo	Cambissolo Háplico	Sedimentar
T2 246	Lavoura	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T2 248	Campo limpo	Neossolo Litólico	Vulcânica
T2 279	Campo sujo	Neossolo Regolítico	Sedimentar
T2 280	Lavoura	Neossolo Litólico	Vulcânica
T3 01	Campo limpo	Neossolo Flúvico	Sedimentar
T3 03	Lavoura	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T3 04	Floresta nativa	Neossolo Flúvico	Sedimentar
T3 05	Campo limpo	Neossolo Flúvico	Sedimentar
T3 12	Campo limpo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T3 21	Campo limpo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T3 22	Vegetação secundária	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T3 89	Campo sujo	Neossolo Litólico/Cambissolo	Sedimentar
T4 17	Floresta nativa	Neossolo Litólico	Sedimentar
T4 41	Campo limpo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T4 44	Campo limpo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T4 54	Campo limpo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T4 59	Lavoura	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar
T4 60	Lavoura	Planossolo Háplico	Sedimentar
T4 61	Campo limpo	Planossolo Háplico	Sedimentar
T4 92	Campo sujo	Argissolo Bruno-Acinzentado	Sedimentar

⁽¹⁾ Amostras da malha de amostragem da área de estudo. ⁽²⁾ Uso da terra conforme Samuel-Rosa et al., (2011). ⁽³⁾ Solos da área de estudo conforme Miguel et al., (2011). ⁽⁴⁾ Geologia da área de estudo conforme Maciel Filho (1990).

As amostras das estradas e canais foram coletadas em locais onde está ocorrendo a remoção de material. Nas estradas, as amostras foram mais representativas de horizontes subsuperficiais e nos canais onde o rio imprime maior energia para retirada de material das margens (anexo 2).

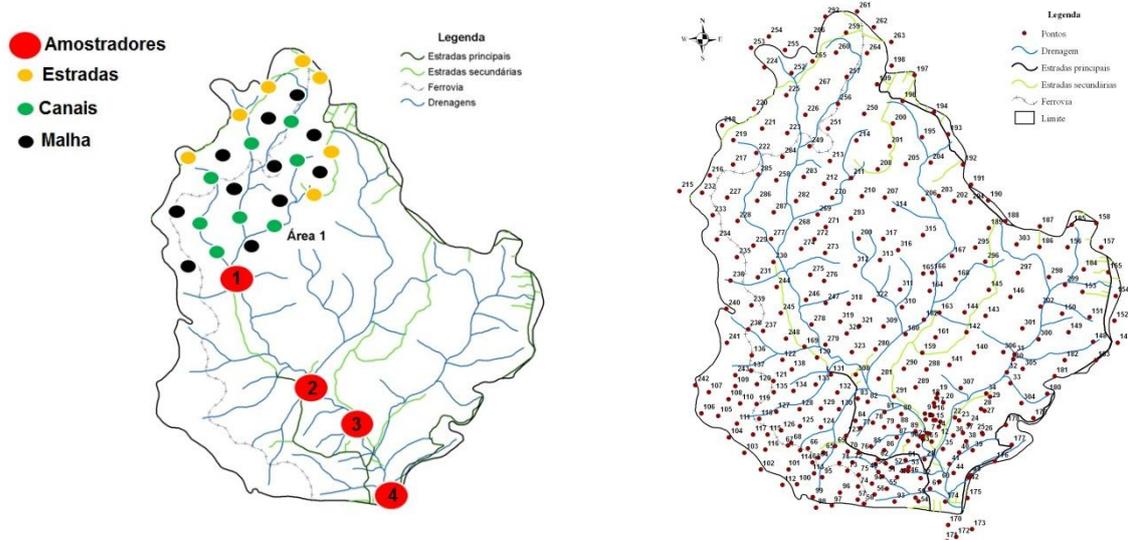


Figura 3. Indicação dos locais das coletas das fontes de produção de sedimentos, dos locais de instalação dos amostradores (torpedos) e da malha de amostragem superficial dos solos da bacia hidrográfica (SAMUEL-ROSA et al., 2011).

Apesar da proximidade com a cidade de Santa Maria, com linhas de transporte público, por exemplo, as estradas não possuem pavimentação e se encontram frequentemente em mau estado de conservação. Através de observações de campo foi constatada uma significativa descarga de sedimentos que são retirados das estradas em eventos de chuva e são carregados até a calha dos canais secundários ou muitas vezes para dentro da drenagem principal da bacia, o Rio Vacacaí-Mirim. Muitas dessas estradas seguem o fluxo das águas e servem de canal escoadouro das chuvas e sedimentos. Os canais fluviais da bacia em questão se apresentam com fortes indícios de assoreamento e desestabilização das margens, com conseqüente mudança no curso do seu leito confirmado por Paiva et al. (2001). Isso é resultado da má conservação das margens, principalmente da drenagem principal e dos conflitos de uso da terra bem como falta da manutenção de áreas de preservação permanente (APPs).

4.3 Coleta das amostras de sedimentos em suspensão

Para a coleta de sedimentos em suspensão foram instalados amostradores (torpedos) em quatro pontos (T1, T2, T3 e T4) ou seções do Rio Vacacaí-Mirim que é a drenagem principal da bacia (anexo 3). A avaliação, bem como a determinação da proporção de cada fonte, foi realizada para cada ponto de coleta separadamente. Cabe salientar que cada ponto de coleta englobava uma divisão da bacia ou uma sub-bacia, assim, à medida que foram sendo analisados cada um dos pontos, as amostras das fontes foram sendo somadas em cada amostrador. Dessa maneira, para a análise do amostrador 4 (T4) foram utilizadas todas as amostras das fontes coletadas na bacia hidrográfica.

Os equipamentos consistem em um cano de PVC “cap” de 0,1 m/1 m, fechados em ambas as extremidades e com pequenos orifícios em cada ponta para a entrada de material, colocado dentro da calha do Rio (Figura 4). O período de monitoramento de coleta desse sedimento foi de três a quatro meses (1ª coleta – instalação dia 15 de maio de 2011 e coleta do sedimento no dia 15 de agosto de 2011; 2ª coleta dia 15 de dezembro de 2011) tempo estimado para que se obtenha uma quantidade suficiente de material para a análise.

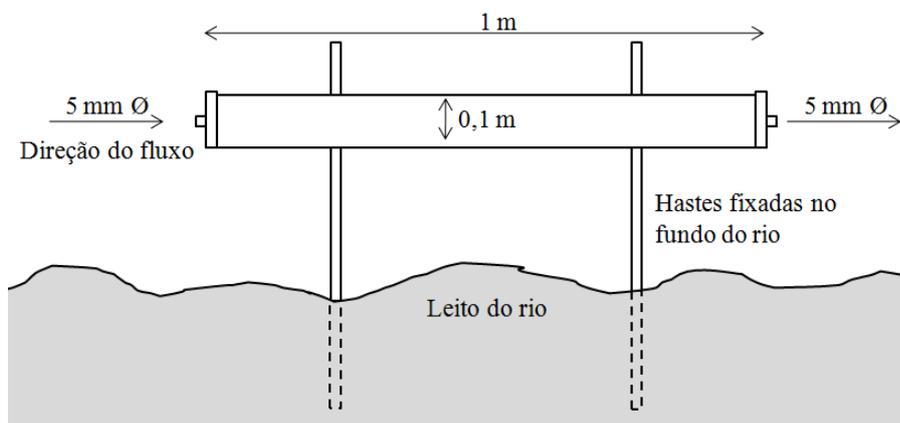


Figura 4. Esquema do amostrador de sedimento em suspensão contínuo (adaptado de Collins et al, 2010).

4.4 Análises físicas

Após coletadas, as amostras foram secas ao ar e posteriormente determinada a granulometria segundo Embrapa (1997). No presente trabalho foi considerado um padrão de granulometria para os procedimentos de análises químicas e mineralógicas de 150 μm , pelo fato de mais de 90% da granulometria do sedimento estar abaixo desse diâmetro de partícula. Sendo assim, para o fator de correção foi determinada a composição granulométrica de todas as amostras das fontes e do sedimento em suspensão utilizando granulômetro a laser marca Beckman Coulter LS 13 320, após dispersão química das amostras e 12 h de agitação. Para o cálculo da fórmula de Horowitz (1991) foi utilizada a porcentagem de areia fina (Fars), ou seja, o valor encontrado entre a fração 63 μm e a fração 150 μm .

Como a concentração dos elementos químicos é dependente da granulometria dos sedimentos em suspensão, Horowitz (1991) propôs uma correção das concentrações utilizando-se a fórmula: $Z_{si} = C_o[100/(100 - Fars)]$, em que Z_{si} é a concentração corrigida das fontes e do elemento químico analisado (i), C_o é a concentração media original do elemento químico analisado e Fars é a porcentagem da fração maior que 63 μm das amostras da fonte. Dessa forma, corrigindo a concentração dos elementos químicos nos sedimentos e no solo das fontes, a comparação entre esses pode ser possível e a incerteza relacionada ao enriquecimento dos sedimentos com partículas finas pode ser contornada ou minimizada.

4.5 Análises químicas

As amostras das fontes e o sedimento em suspensão depois de passar por peneira com abertura de 150 μm foram 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, Co, Cu, Cr, P, Fe, Pb, Mg, Mn, La, Li, Ni, Sr, K, Na, Zn, Si, Ti, e V nesses extratos foram determinados por Inductively Coupled Plasma (ICP).

Para determinar os teores e a composição química dos óxidos de baixa e alta cristalinidade, foram utilizados os métodos do oxalato de amônio 0,2 mol L^{-1} , pH 3,0

(OAA) (SCHWERTMANN, 1964) e o do ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (MEHRA e JACKSON, 1960), respectivamente. Após as extrações, os teores de Fe, Mn e Al foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método Mébius no bloco de digestão (YEOMANS e BREMNER, 1988).

4.6 Análises mineralógicas

A difratometria de raios X (DRX) foi realizada em amostras da fração argila. As amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) foram tratadas com H_2O_2 a 30% para remoção de matéria orgânica, e com $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ para dispersão das partículas por agitação em agitador tipo horizontal com esferas de nylon como dispersante físico (EMBRAPA, 1997). Após esses tratamentos prévios, a fração areia foi retida em peneira de $53 \mu\text{m}$ e as frações argila e silte foram recolhidas em provetas de 1000 cm^{-3} e separadas por sedimentação com base na lei de Stokes (EMBRAPA, 1997).

Os óxidos de Fe da fração argila foram concentrados utilizando-se $NaOH$ 5 mol L^{-1} a quente (NORRISH e TAYLOR, 1961). Foi adicionado silício, na forma de metassilicato de sódio ($Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$), de modo que a concentração de Si na solução fosse de $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, evitando, assim, a dissolução de óxidos de ferro com alta substituição isomórfica em Al (KÄMPF e SCHWERTMANN, 1982). A sodalita [$Na_4Al_3Si_3O_{12}(OH)$] formada durante o tratamento com $NaOH$ 5 mol L^{-1} foi removida por lavagens com HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (NORRISH e TAYLOR, 1961), empregando-se duas lavagens de 10 minutos com 50 mL de solução, sendo a suspensão continuamente agitada com bastão de vidro (SINGH e GILKES, 1991). A fração de óxidos de Fe concentrada foi analisada por DRX. A lâmina em pó foi analisada numa amplitude de 10 a $40^\circ 2\theta$. A posição dos picos do Quartzo, em cada amostra, foi utilizada como padrão interno para correção das distorções instrumentais.

Para determinação da perda de massa dos óxidos de ferro cristalinos foi utilizado o mesmo procedimento de extração com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (MEHRA e JACKSON, 1960). Após a extração foram realizadas lavagens do resíduo das extrações de DCB com solução de $(NH_4)_2CO_3$ 1 mol L^{-1} e água deionizada para

remover o excesso de sais e determinada a quantidade de material extraído pela diferença entre a massa seca (24 h em estufa a 60 °C) antes e após os tratamentos.

A relação (R) entre goethita (Gt) e hematita (Hm) ($R = Gt/Gt + Hm$) foi estimada com base na área dos picos dos minerais por DRX, segundo Torrent e Cabedo (1986), em amostra previamente tratada com NaOH 5 mol L⁻¹ (fração óxido de Fe concentrada). A substituição isomórfica de Fe por Al (SI) na estrutura da Hm e Gt foi estimada pela posição dos picos destes minerais. A SI na Gt foi calculada segundo Schulze (1984) e na Hm segundo Schwertmann et al. (1979).

Segundo Schulze (1984) o grau de substituição de ferro por alumínio na goethita é avaliado pela posição dos reflexos 111 e 110, segundo a fórmula: $Al (cmol mol^{-1}) = 1730 - 572c$; Onde: $c = 1/(1/d_{111}^2 - 1/d_{110}^2)^{1/2}$ sendo d_{111} e d_{110} os espaçamentos (Å) da goethita nos planos considerados. Na hematita, a substituição isomórfica foi avaliada pela posição dos reflexos 110 segundo a fórmula: $Al (cmol mol^{-1}) = 3109 - 617,14 a_o$; Onde; $a_o = d_{110} \times 2$ sendo d_{110} o espaçamento (nm) da hematita no plano considerado.

A estimativa das quantidades de goethita e de hematita foi realizada por meio do cálculo da área dos reflexos da goethita no plano 110 (Gt 110) e da hematita no plano 012 (Hm 012), multiplicando-se a área do reflexo da Gt 110 (100 %) por 0,3, já que a intensidade do reflexo da Hm 012 é de 30 % (KÄMPF e SCHWERTMANN, 1998). Esta estimativa foi expressa pela relação (Gt/Gt + Hm). Os teores de Hm e Gt da foram estimados alocando-se os teores de Fe₂O₃-DCB de cada amostra, considerando-se a relação Gt/(Gt+Hm), fórmula mínima desses minerais e substituição isomórfica de Fe por Al (MELO et al., 2001), conforme as seguintes equações:

$$[Gt/(Gt + Hm)] \times Fed\% = FeGt\%$$

$$FeGt\% \times 1,59 = FeOOH = Gt\%$$

$$Fed\% - FeGt\% = FeHm\%$$

$$FeHm\% \times 1,43 = Fe_2O_3 = Hm\%$$

4.7 Análise termodiferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG)

A análise térmica das amostras de argila previamente tratadas com DCB conforme Mehra e Jackson (1960) foi realizada em um derivatógrafo com módulo de Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencial (ATD) SHIMADZUDTG-60, Simultâneo DTA-TG APPARATUS. Foram utilizados 15 mg (± 1 mg) de argila dispostos em cadinhos de platina e analisados de 30 até 800 °C com taxa de aquecimento de 20 °C min⁻¹ de 30 °C a 800 °C, sob atmosfera de gás N₂, com fluxo de 40 ml min⁻¹. Foi utilizado um cadinho de platina vazio como material termicamente inerte de referência.

A quantificação dos minerais foi realizada com base na perda de massa evidenciada pela TG, com intervalos aferidos pelos eventos térmicos produzidos pela ATD. Os minerais 2:1 foram quantificados pela perda de massa nos intervalos de 130 °C ao primeiro evento térmico de desidroxilação. A gibbsita foi quantificada pela perda de massa entre 230 e 300 °C e a caulinita pela perda de massa entre 270 e 730 °C.

O cálculo da quantidade dos minerais efetuado foi o seguinte:

$$\text{Mineral \%} = (\text{PM}_{\text{amostra}}/\text{PM}_{\text{mineral puro}}) \times 100$$

Onde: PM: perda de massa em %. As perdas de massa de minerais puros são as seguintes: 2:1 (água nas entrecamadas) = 18%; Gibbsita (desidroxilação) = 34,6% e Caulinita (desidroxilação) = 13,9% (JACKSON, 1979).

Para a avaliação da perda de massa tanto da caulinita como dos minerais 2:1 foi considerada a perda de massa das amostras desferrificadas (tratada com DCB), usadas para as leituras no ATD, fazendo assim uma correção dos cálculos.

Portanto, as variáveis mineralógicas usadas foram: perda de massa da caulinita (PM Kt) e minerais 2:1 (PM 2:1), perda de massa após tratamento com DCB (PM DCB), quantidade de caulinita (kt), minerais 2:1 (2:1), hematita (Hm) e goethita (Gt). Considerando as análises pedogeológicas e mineralógicas, 36 variáveis foram analisadas para caracterizar o solo das fontes e sedimento e usadas também para os procedimentos estatísticos.

4.8 Discriminação das fontes de sedimentos

Após as determinações das características físicas, químicas e mineralógicas, dois procedimentos de análise estatística foram realizados. A primeira etapa da análise estatística constitui em estabelecer o conjunto de variáveis com capacidade de discriminar as fontes, ou seja, as variáveis precisam apresentar diferenças significativas na sua concentração entre as fontes a serem identificadas e que haja manutenção desta propriedade durante a remoção e o transporte dos materiais das fontes, até a calha do rio.

Para isso foram utilizados dois testes estatísticos: o teste H não-paramétrico ou teste *Kruskal-Wallis* (LEVIN, 1999) e uma função discriminante multivariada. O teste H permitiu testar a hipótese nula em que K amostras aleatórias independentes são provenientes de uma mesma população em nível de significância de 1 a 10%. 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).

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

onde R_s se refere à soma das posições em que cada amostras da fontes s assume quando todas as amostras são colocadas em ordem crescentes (*ranks*); n_s é o número de observações da fonte s ; n , a soma dos n_s 's; e k , o número de fontes.

O *Kruskal-Wallis* testa as diferenças entre as três fontes: malha, canal e estrada, para um elemento i qualquer sendo n_s igual a 7, 7 e 6 (para o amostrador T1, por exemplo). O valor de n corresponde a soma dos n_s que é igual a 20. Todos os dados são colocados em ordem decrescente e associados a um *rank* de valores (1 a 20). Para cada fonte (s) são somados os seus respectivos ranks (R_s) sendo que desta forma pode ser aplicada a equação e calculado o valor de H de cada elemento.

Cabe salientar que quando $n_1 > 5$ para todas as fontes o teste de *Kruskal-Wallis* se aproxima da distribuição Qui-quadrada com $k-1$ graus de liberdade. Dessa forma pode ser testada a hipótese nula (H_0) comparando o valor de H calculado pela equação (1), com os valores críticos encontrados em tabelas de distribuição Qui-quadrada. Quando se aceita (H_0) as populações são idênticas, e quando se rejeita (H_0) e se aceita a hipótese alternativa (H_1) é que as populações diferem.

H_0 : amostras independentes pertencentes a mesma população

H_1 : nem todas as amostras são da mesma população

Se o valor de H calculado exceder o valor crítico de H , com $k-1$ graus de liberdade e grau de significância 10%, a hipótese nula deve ser rejeitada, ou seja, a probabilidade é pequena (10% ou menos) de se observar diferenças das amostras. Se as observações são provenientes da mesma população, a variável apresenta capacidade discriminante entre as fontes.

Somente com as variáveis que apresentam capacidade discriminante não é possível a aplicação do método. Portanto, é preciso definir um conjunto mínimo de variáveis que maximiza a discriminação e diminui a dimensionalidade (Collins et al., 1997). Dessa forma, o segundo teste foi uma função discriminante multivariada que determina o número mínimo de variáveis que maximiza a discriminação das fontes. O procedimento foi realizado com auxílio de programas estatísticos através de um algoritmo do tipo “*stepwise*” baseado no parâmetro Lambda de Wilks (Λ^*) da análise de variância multivariada (MANOVA) 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.

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

em que $|W|$ é o determinante da matriz da soma dos quadrados devido ao erro, enquanto $|B + W|$ representa o determinante da matriz da soma dos quadrados totais.

O conjunto de variáveis que apresente a melhor capacidade discriminante é encontrado, testando a hipótese inicial que considera os efeitos do tratamento (fontes) iguais ($H_0: T_1 = T_2 = \dots = T_k$), contra a hipótese alternativa H_1 que explica as diferenças significativas entre os tratamentos ($H_1: T_1, T_2, \dots, T_r$). Quanto menor for Λ^* , a hipótese de rejeitar H_0 é mais evidente, indicando que o conjunto de variáveis testadas apresenta capacidade discriminante.

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). Esta etapa consiste na determinação da contribuição de cada fonte de sedimento (%) que compõe a produção total de sedimentos. Para isso, foi comparado o conjunto de variáveis traçadoras determinadas nas fontes e nos sedimentos em suspensão a fim de encontrar a melhor proporção de cada fonte.

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

em que y_i é o valor da variável i obtida no sedimento em suspensão, a_{is} são os coeficientes do modelo linear (concentração do elemento químico i na fonte s) e P_s é 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 mincon) (Equação 4) compilando o algoritmo no programa *Matlab*® através da função “fmincon” para encontrar os valores de P . 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 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 .

Para confirmar que o processo de otimização da Equação 4 forneceu resultados aceitáveis foram comparados os resultados da concentração química dos elementos utilizados (variáveis traçadoras) nos sedimentos em suspensão e o valor predito pelo modelo, com base na proporção calculada para cada fonte. 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.

4.9 Etapas da avaliação de contribuição das fontes

A contribuição de cada uma das fontes de produção de sedimentos avaliadas foi determinada usando dois conjuntos de variáveis: pedogeoquímicas e pedogeoquímicas + mineralógicas, e dois conjuntos de fontes de produção de sedimentos: malha, canal e estradas; superficial e subsuperficial.

Na primeira etapa foram levados em consideração os 4 pontos amostrais de coleta de sedimentos (T1, T2, T3 e T4) e o conjunto de variáveis pedogeoquímicas, aplicando os testes estatísticos já citados anteriormente para todas as amostras coletadas. Sendo assim, foram obtidos 4 conjuntos de variáveis, através da análise discriminante, que foram usados para determinar a contribuição de cada uma das fontes.

Posteriormente, o mesmo procedimento foi aplicado, com a adição de variáveis mineralógicas para compor o modelo de predição. No entanto, cabe salientar que a determinação dos parâmetros mineralógicos foram realizados em um número reduzido de amostras (7 amostras dos canais, 7 amostras das estradas, 8 amostras da malha e sedimento em suspensão referentes ao ponto T4). Assim, uma nova análise foi realizada tendo por base somente um ponto de coleta de sedimentos em suspensão (T4). O custo e demora na obtenção dos dados mineralógicos (DRX e ATD-TG) foram preponderantes na decisão de usar um número menor de amostras. Além disso, todas as amostras apresentam o mesmo material de origem (sedimentar) concluindo-se que as mesmas seguem um padrão semelhante de mineralogia em toda a bacia hidrográfica.

Na segunda etapa, foi obtido um único conjunto de variáveis para serem usadas no modelo de predição, sendo que, as variáveis mineralógicas selecionadas anteriormente pelos testes estatísticos foram usadas para compor o modelo de predição. Esse conjunto teve por base todas as amostras coletadas na bacia. A determinação de contribuição de cada fonte para cada local de coleta de sedimento em suspensão (T1, T2, T3 e T4) foi obtida usando esse mesmo conjunto de variáveis. Além disso, nesta segunda etapa, foi avaliada a contribuição de fontes superficiais (amostras referentes a malha) e subsuperficiais (amostras referentes a canais e estradas).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Primeira etapa – Abordagem Clássica Fingerprinting

5.1.1 Potencial discriminante das fontes – geoquímica

Das 29 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 % ($H_{\text{crítico}} = 4,60$), somente algumas foram selecionadas. Esse teste permite estabelecer se há diferença entre as fontes elencando quais variáveis apresentam capacidade discriminante. Além disso, é importante salientar que todas as variáveis se distinguem quanto as suas origens, suas propriedades químicas e ambientais.

O teste de Kruskal-Wallis selecionou diferentes variáveis em cada local de coleta (Tabelas 3, 4, 5 e 6). Para o T1 as variáveis selecionadas foram Sr, Ti, COT, Fe_{oxa} , Al_{oxa} e Al_{dcb} . Variáveis relacionadas aos óxidos sejam elas cristalinos ou amorfos, evidenciam fatores de intemperismo e reações de oxidação-redução. O COT, apesar de ser uma variável que pode apresentar problemas na análise pela sua instabilidade no sistema e pelo grande enriquecimento que pode ser encontrado no sedimento em suspensão (MINELLA et al., 2009a), foi utilizado como variável traço, estando associada a fatores de manejo do solo. Para o T2 as variáveis que apresentam capacidade discriminante foram Ba, Mg, La, Sr, Ti, Pb, Na, Be, P, COT. Para o T3 as variáveis que apresentam capacidade discriminante foram Ca, Ba, Mg, La, Sr, Zn, Ti, Pb, Na, Be, P, V, COT, Fe_{EPA} , Fe_{oxa} , Mn_{total} , Mn_{oxa} , Mn_{dcb} . Para o T4, 75% das variáveis apresentaram capacidade discriminante, ficando fora da análise somente as variáveis como K, Cr, Co, Si, Mn_{oxa} , Al_{oxa} , Al_{dcb} .

Algumas variáveis mostraram capacidade discriminante em todos os pontos de coleta avaliados. O COT, Ti, Sr, aparecem como variáveis discriminantes em todas as análises. Elementos como Ba, Mg, La, Sr, Ti, Pb, Na, Be e P, mostraram capacidade discriminante para os pontos de coleta T2, T3, e T4. Deve se ter um cuidado com elementos de maior instabilidade como o Na, por exemplo, este pode sofrer modificações como enriquecimentos de seus teores nos sedimentos em suspensão comprometendo assim a análise de contribuição de cada fonte.

O P é um elemento que não apresenta capacidade discriminante para o ponto T1. Como esse elemento está associado a condições de ocupação agrícola nas bacias e em áreas de lavoura, por exemplo, onde são aplicados adubos fosfatados, facilmente ocorre a diferenciação entre fontes (MINELLA et al., 2007). Mesmo que o ponto T1 possua uma coleta de sedimento em suspensão de uma sub-bacia com ocupação agrícola maior, comparada aos demais locais, visto a maior concentração média do elemento nas fontes para o ponto T1, a quantidade do elemento não diferiu entre as fontes. Contudo, para os demais pontos de coletas (T2, T3 e T4) o P se mostrou como uma variável com poder de discriminação visto que esse elemento apresenta relação com partículas de argila e óxidos, o que o torna um bom traçador de sedimentos em suspensão (MINELLA et al., 2007). Os elementos Zn, Ti, V, Fe_{EPA} , Fe_{oxa} , Fe_{dcb} , Mn_{EPA} , Mn_{oxa} , Mn_{dcb} , classificados como metais de transição, apresentam capacidade discriminante entre as fontes e geralmente apresentam boa conservatividade (HOROWITZ, 1991). Dentre os metais de transição o Cr, Co, Ni e Cu, não apresentaram capacidade discriminante.

Tabela 3. Resultados do teste de *Kruskal-Wallis* para cada variável e teor de cada variável no solo das fontes no local de coleta T1 (torpedo 1).

Variável	Teste <i>Kruskal-Wallis</i>		Concentração média nas fontes (g.kg ⁻¹)		
	H ⁽²⁾	p ⁽³⁾	Estrada	Canal	Malha
<i>Teor EPA⁽¹⁾</i>					
Alumínio (Al)	3,073	0,2151	39,762	25,664	29,060
Ferro (Fe)	0,551	0,7592	43,913	33,830	38,341
Cálcio (Ca)	1,716	0,4239	2,208	3,227	2,598
Bário (Ba)	1,998	0,3681	0,150	0,203	0,225
Magnésio (Mg)	1,770	0,4127	4,331	4,877	4,102
Lantânio (La)	0,461	0,7940	0,021	0,022	0,019
Lítio (Li)	0,681	0,7112	0,023	0,019	0,020
Manganês (Mn)	4,083	0,1298	1,217	1,129	2,130
Níquel (Ni)	3,457	0,1775	0,011	0,009	0,012
Estrôncio (Sr)	12,110	0,0023*	0,027	0,094	0,047
Zinco (Zn)	1,538	0,4633	0,027	0,036	0,035
Potássio (k)	0,823	0,6626	1,883	1,863	2,021
Titânio (Ti)	5,678	0,0585*	3,973	5,158	4,712
Chumbo (Pb)	2,940	0,2298	0,008	0,014	0,009
Cobre (Cu)	3,729	0,1550	0,039	0,056	0,055
Cromo (Cr)	3,182	0,2037	0,014	0,011	0,014
Sódio (Na)	0,589	0,7446	0,203	0,211	0,192
Berílio (Be)	0,078	0,9616	0,002	0,001	0,002
Cobalto (Co)	1,324	0,5157	0,029	0,024	0,039
Fósforo (P)	3,474	0,1760	0,323	0,326	0,465
Silício (Si)	3,073	0,2151	0,164	0,134	0,135
Vanádio (V)	1,157	0,5605	0,150	0,180	0,174
Carbono (COT)	12,256	0,0022*	9,825	25,022	26,980
Dissolução seletiva					
Fe (DCB) ⁽⁴⁾	0,029	0,9855	30,864	32,000	27,164
Fe (oxa) ⁽⁵⁾	13,221	0,0013*	2,664	3,704	11,322
Mn (DCB)	4,088	0,1295	0,934	1,088	0,801
Mn (oxa)	4,280	0,1176	0,476	0,134	0,079
Al (DCB)	5,100	0,0781*	3,105	2,630	2,034
Al (oxa)	8,818	0,0122*	2,116	2,362	1,531

⁽¹⁾ Teores dos elementos extraídos pelo método EPA 3050B. ⁽²⁾ Valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado - $H_{\text{crítico}}(90\%; 2 \text{ gl}) = 4,60$; ⁽³⁾ Probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrado; * valores de $p < 0,10$. ⁽⁴⁾ Teores de elementos extraídos com Ditionito-Citrato-Bicarbonato (MEHRA e JACKSON, 1960). ⁽⁵⁾ Teores dos elementos extraídos com Oxalato de Amônio (SHWERTMANN, 1964).

Tabela 4. Resultados do teste de *Kruskal-Wallis* para cada variável e teor de cada variável no solo das fontes no local de coleta T2 (torpedo 2).

Variável	Teste <i>Kruskal-Wallis</i>		Concentração média nas fontes (g.kg ⁻¹)		
	H ⁽²⁾	p ⁽³⁾	Estrada	Canal	Malha
<i>Teor EPA⁽¹⁾</i>					
Alumínio (Al)	3,409	0,1818	34,065	30,992	24,720
Ferro (Fe)	3,170	0,2049	36,745	35,562	27,563
Cálcio (Ca)	4,389	0,1114	2,577	2,855	2,610
Bário (Ba)	6,739	0,0344*	0,124	0,162	0,155
Magnésio (Mg)	7,947	0,0188*	4,484	4,732	4,209
Lantânio (La)	7,623	0,0221*	0,019	0,024	0,016
Lítio (Li)	2,549	0,2795	0,021	0,021	0,016
Manganês (Mn)	4,065	0,2160	0,948	1,084	1,484
Níquel (Ni)	1,991	0,3694	0,020	0,013	0,013
Estrôncio (Sr)	20,806	0,0000*	0,042	0,063	0,037
Zinco (Zn)	3,946	0,1390	0,023	0,028	0,025
Potássio (k)	0,938	0,6255	1,744	1,934	2,018
Titânio (Ti)	10,018	0,0067*	3,770	4,587	4,003
Chumbo (Pb)	14,736	0,0006*	0,006	0,010	0,008
Cobre (Cu)	1,143	0,5646	0,065	0,054	0,050
Cromo (Cr)	1,073	0,5847	0,017	0,014	0,013
Sódio (Na)	6,133	0,0466*	0,342	0,239	0,230
Berílio (Be)	5,314	0,0702*	0,002	0,002	0,001
Cobalto (Co)	0,112	0,9453	0,027	0,028	0,030
Fósforo (P)	5,670	0,0587*	0,237	0,290	0,351
Silício (Si)	0,439	0,8028	0,139	0,151	0,134
Vanádio (V)	4,455	0,1078	0,168	0,186	0,136
Carbono (COT)	24,914	0,0000*	10,053	15,376	22,787
Dissolução seletiva					
Fe (DCB) ⁽³⁾	1,610	0,4469	22,871	22,356	20,807
Fe (oxa) ⁽⁵⁾	2,058	0,3572	1,377	4,812	1,986
Mn (DCB)	3,447	0,1784	0,717	0,901	0,963
Mn (oxa)	0,327	0,8491	0,439	0,439	0,379
Al (DCB)	2,589	0,2740	3,264	2,170	2,249
Al (oxa)	2,664	0,2639	1,788	1,303	1,720

⁽¹⁾ Teores dos elementos extraídos pelo método EPA 3050B. ⁽²⁾ Valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado - $H_{crítico}(90\%;2\text{ gl}) = 4,60$; ⁽³⁾ Probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrado; * valores de $p < 0,10$. ⁽⁴⁾ Teores de elementos extraídos com Ditionito-Citrato-Bicarbonato (MEHRA e JACKSON, 1960). ⁽⁵⁾ Teores dos elementos extraídos com Oxalato de Amônio (SHWERTMANN, 1964).

Tabela 5. Resultados do teste de *Kruskal-Wallis* para cada variável e teor de cada variável no solo das fontes no local de coleta T3 (torpedo 3).

Variável	Teste <i>Kruskal-Wallis</i>		Concentração média nas fontes (g.kg ⁻¹)		
	H ⁽²⁾	p ⁽³⁾	Estrada	Canal	Malha
<i>Teor EPA⁽¹⁾</i>					
Alumínio (Al)	2,506	0,2856	27,910	23,961	22,526
Ferro (Fe)	4,661	0,0972*	26,816	28,485	24,055
Cálcio (Ca)	6,233	0,0443*	2,560	2,874	2,268
Bário (Ba)	11,102	0,0039*	0,106	0,167	0,145
Magnésio (Mg)	6,325	0,0423*	3,913	4,281	3,735
Lantânio (La)	7,227	0,0270*	0,021	0,024	0,018
Lítio (Li)	4,417	0,1098	0,015	0,017	0,014
Manganês (Mn)	11,639	0,0030*	0,657	0,974	1,259
Níquel (Ni)	0,573	0,7505	0,015	0,010	0,011
Estrôncio (Sr)	22,228	0,0000*	0,034	0,073	0,037
Zinco (Zn)	9,361	0,0093*	0,019	0,027	0,023
Potássio (k)	0,183	0,9123	1,871	1,742	2,091
Titânio (Ti)	13,165	0,0014*	3,250	4,588	3,747
Chumbo (Pb)	15,959	0,0003*	0,006	0,011	0,008
Cobre (Cu)	2,832	0,2426	0,050	0,051	0,043
Cromo (Cr)	0,046	0,9771	0,014	0,012	0,012
Sódio (Na)	7,175	0,0277*	0,311	0,210	0,188
Berílio (Be)	8,480	0,0144*	0,001	0,002	0,001
Cobalto (Co)	3,917	0,1410	0,019	0,022	0,025
Fósforo (P)	12,785	0,0017*	0,189	0,254	0,321
Silício (Si)	0,208	0,9010	0,135	0,134	0,131
Vanádio (V)	8,688	0,0130*	0,128	0,170	0,119
Carbono (COT)	33,299	0,0000*	8,997	18,054	20,863
<i>Dissolução seletiva</i>					
Fe (DCB) ⁽⁴⁾	4,060	0,1313	17,650	20,807	17,714
Fe (oxa) ⁽⁵⁾	6,172	0,0457*	1,597	4,617	1,741
Mn (DCB)	14,683	0,0006*	0,462	0,776	0,886
Mn (oxa)	7,161	0,0279*	0,273	0,472	0,447
Al (DCB)	0,144	0,9303	2,801	2,337	2,321
Al (oxa)	3,876	0,1439	1,589	1,277	1,638

⁽¹⁾ Teores dos elementos extraídos pelo método EPA 3050B. ⁽²⁾ Valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado - $H_{crítico}(90\%;2\text{ gl}) = 4,60$; ⁽³⁾ Probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrado; * valores de $p < 0,10$. ⁽⁴⁾ Teores de elementos extraídos com Ditionito-Citrato-Bicarbonato (MEHRA e JACKSON, 1960). ⁽⁵⁾ Teores dos elementos extraídos com Oxalato de Amônio (SHWERTMANN, 1964).

Tabela 6. Resultados do teste de *Kruskal-Wallis* para cada variável e teor de cada variável no solo das fontes no local de coleta T4 (torpedo 4).

Variável	Teste <i>Kruskal-Wallis</i>		Concentração média nas fontes (g.kg ⁻¹)		
	H ⁽²⁾	p ⁽³⁾	Estrada	Canal	Malha
<i>Teor EPA⁽¹⁾</i>					
Alumínio (Al)	8,237	0,0163*	27,910	23,558	19,959
Ferro (Fe)	10,164	0,0062*	26,816	27,814	19,873
Cálcio (Ca)	11,022	0,0040*	2,560	2,816	2,000
Bário (Ba)	11,630	0,0030*	0,106	0,163	0,126
Magnésio (Mg)	11,939	0,0026*	3,913	4,184	3,295
Lantânio (La)	11,776	0,0028*	0,021	0,024	0,017
Lítio (Li)	9,914	0,0070*	0,015	0,016	0,012
Manganês (Mn)	7,181	0,0276*	0,657	0,918	1,049
Níquel (Ni)	5,063	0,0795*	0,015	0,010	0,009
Estrôncio (Sr)	26,881	0,0000*	0,034	0,071	0,032
Zinco (Zn)	9,435	0,0089*	0,019	0,026	0,020
Potássio (k)	0,448	0,7992	1,871	1,715	1,982
Titânio (Ti)	15,312	0,0005*	3,250	4,553	3,288
Chumbo (Pb)	16,581	0,0003*	0,006	0,010	0,008
Cobre (Cu)	7,298	0,0260*	0,050	0,049	0,034
Cromo (Cr)	2,724	0,2561	0,014	0,011	0,011
Sódio (Na)	16,163	0,0003*	0,311	0,207	0,154
Berílio (Be)	15,053	0,0005*	0,001	0,002	0,001
Cobalto (Co)	4,417	0,1099	0,019	0,022	0,020
Fósforo (P)	9,366	0,0093*	0,189	0,248	0,292
Silício (Si)	1,913	0,3842	0,135	0,133	0,123
Vanádio (V)	14,325	0,0008*	0,128	0,165	0,098
Carbono (COT)	30,751	0,0000*	8,997	17,155	18,767
Dissolução seletiva					
Fe (DCB) ⁽⁴⁾	8,956	0,0114*	17,650	20,300	14,367
Fe (oxa) ⁽⁵⁾	7,294	0,0261*	1,597	4,335	1,676
Mn (DCB)	9,916	0,0070*	0,462	0,719	0,742
Mn (oxa)	2,358	0,3076	0,273	0,415	0,343
Al (DCB)	1,099	0,5771	2,801	2,249	2,206
Al (oxa)	1,325	0,5154	1,589	1,220	1,455

⁽¹⁾ Teores dos elementos extraídos pelo método EPA 3050B. ⁽²⁾ Valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado - $H_{\text{crítico}}(90\%; 2 \text{ gl}) = 4,60$; ⁽³⁾ Probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrado; * valores de $p < 0,10$. ⁽⁴⁾ Teores de elementos extraídos com Ditionito-Citrato-Bicarbonato (MEHRA e JACKSON, 1960). ⁽⁵⁾ Teores dos elementos extraídos com Oxalato de Amônio (SHWERTMANN, 1964).

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 7). 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^* . Isso se deve ao aumento da quantidade de amostras analisadas em cada uma das análises. Por exemplo, para o local T1 foram analisadas 20 amostras divididas em três fontes e para o local T4 foram analisadas 90 amostras distribuídas dentro das mesmas três fontes de produção de sedimentos.

O valor de Λ^* é definido como a proporção da variabilidade total das fontes devido ao erro. Dessa maneira para o local de coleta T1, o conjunto de variáveis selecionadas reduziu o erro para 3,8%, ou seja, esse conjunto de variáveis explica, aproximadamente, 96% das diferenças entre as fontes. Para os demais locais ocorreu um aumento no erro (14%) com um maior número de variáveis selecionadas. É importante que exista um grande número de variáveis que apresentam diferença entre as fontes, pois cada uma delas pode estar relacionada a um tipo de erosão (SMALL et al., 2002). Contudo, segundo Minella et al. (2007), isso pode dificultar a análise para obtenção da contribuição de cada fonte, por isso a importância de otimizar o conjunto de elementos a ser utilizados e maximizar a discriminação com o menor número possível de variáveis.

Tabela 7. Resultado da análise da função discriminante, com acréscimo gradual de cada variável e os valores correspondentes da minimização do Wilk's Lambda (Λ^*).

Step	T1		T2		T3		T4	
	Variáveis	$\Lambda^{*(1)}$	Variáveis	Λ^*	Variáveis	Λ^*	Variáveis	Λ^*
1	Fe oxa	0,182	COT	0,522	COT	0,589	COT	0,693
2	COT	0,064	Sr	0,278	Sr	0,402	Sr	0,454
3	Al oxa	0,038	Na	0,201	Na	0,321	Na	0,351
4			P	0,169	Fe oxa	0,280	Al total	0,285
5			Ti	0,148	P	0,252	P	0,248
6					Be	0,221	Ti	0,217
7					Mn oxa	0,198	Ni	0,196
8					Ba	0,183	Be	0,181
9					Fe total	0,171	Fe oxa	0,167
10					Ti	0,154	Ba	0,154
11					Mn DCB	0,140	Mg	0,145
12							Zn	0,139

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

Através da análise discriminante e avaliação do parâmetro Wilk's Lambda foi possível identificar se as amostras das fontes foram classificadas corretamente (Tabela 8). A matriz de classificação mostra que a porcentagem de classificação foi superior a 90% em todos os locais de coleta onde para o local T1 somente uma amostra foi classificada de forma errônea, obtendo assim um índice de 95% de amostras classificadas corretamente. A menor porcentagem de classificação das amostras para os demais três locais está atrelado ao maior número de amostras avaliadas e a distância de coleta que é maior a medida que são agrupadas as amostras para cada um dos pontos avaliados.

Tabela 8. Matriz de classificação das amostras e probabilidade de cada amostra pertencer às fontes.

Pontos ¹	Fonte	% correta	Malha	Canal	Estrada	Total
T1	Malha	85,7	6	1	0	20
	Canal	100,0	0	7	0	
	Estrada	100,0	0	0	6	
	Total	95,0	6	8	6	
T2	Malha	81,2	13	1	2	48
	Canal	100,0	0	18	0	
	Estrada	92,8	0	1	13	
	Total	91,6	13	20	15	
T3	Malha	91,6	22	1	1	78
	Canal	92,5	1	25	1	
	Estrada	85,1	0	4	23	
	Total	89,7	23	30	25	
T4	Malha	93,7	30	2	0	90
	Canal	93,5	1	29	1	
	Estrada	81,4	2	3	22	
	Total	90,0	33	34	23	

⁽¹⁾ Locais de coleta de sedimento em suspensão identificados como Torpedos (T1, T2, T3 e T4).

Para correção dos efeitos de diluição do material grosseiro das fontes foi realizado o cálculo do fator de correção (Tabela 9), sendo possível assim a comparação dos teores dos elementos químicos das fontes com os dos sedimentos em suspensão. Neste estudo foi considerado como material não reativo a fração maior que 150 µm. Para o fator de correção foi utilizada a porcentagem de diferença entre as frações 150 e 63 µm, que segundo Horowitz (1991) seriam as partículas

primárias, corrigindo assim as concentrações químicas das fontes por meio dessa proporção.

O fato para que fosse usado tal limite de granulometria está relacionado com a característica do sedimento coletado. A maior proporção do sedimento (90%) ficou concentrada em diâmetro menor que 150 µm. Isso se deve a características dos tipos de solos que são encontrados na bacia, visto que, segundo Miguel et al. (2011), os solos que predominam são solos de textura mais arenosa principalmente no horizonte superficial como os Argissolos. Até mesmo os solos menos desenvolvidos da área apresentam esta característica. O material de origem possui influência direta pelo fato de que a área apresenta solos derivados de arenito da Formação Botucatu e da Formação Caturrita conferindo aos solos tal característica textural (SARTORI, 2009). As fontes onde as coletas foram realizadas nos horizontes subsuperficiais (horizontes B e/ou C) também apresentam tal conformação.

Tabela 9. Fatores de correção para os efeitos da diluição do material grosseiro.

Ponto	Fonte	% areia fina	$100/(100-F_{ars})^{(1)}$
Amostrador 1	Malha	13,1	1,16
	Canal	32,0	1,55
	Estrada	16,8	1,24
Amostrador 2	Malha	25,3	1,42
	Canal	27,5	1,41
	Estrada	44,8	2,12
Amostrador 3	Malha	40,1	1,83
	Canal	31,2	1,57
	Estrada	35,5	1,64
Amostrador 4	Malha	51,5	1,64
	Canal	38,2	1,53
	Estrada	35,5	1,70

⁽¹⁾ porcentagem da fração maior que 63 µm das amostras das fontes.

5.1.2 Classificação das amostras de sedimento em suspensão

O modelo de classificação das amostras de sedimentos em suspensão somente não foi eficiente na minimização da função objetiva para o ponto T1 em ambas as coletas de sedimento. Para os demais, T2, T3 e T4 o modelo se mostrou satisfatório visto que, os erros médios relativos foram menores que 15% (Figuras 5 e 6).

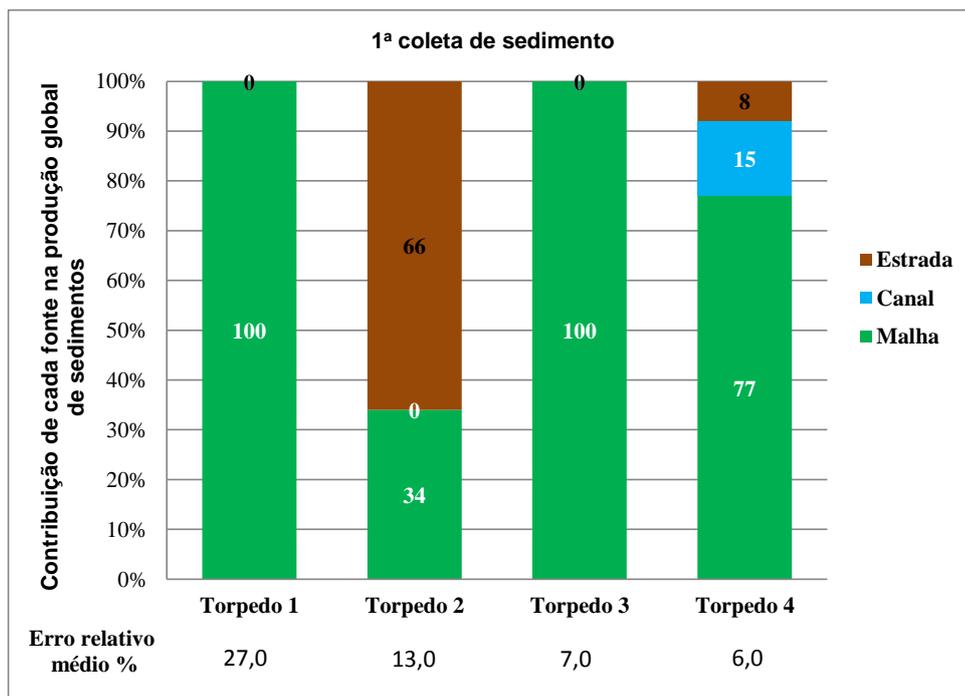


Figura 5. Contribuição relativa das áreas de estrada, canal e malha de amostragem na produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, Santa Maria, RS, para a primeira coleta de sedimento em suspensão.

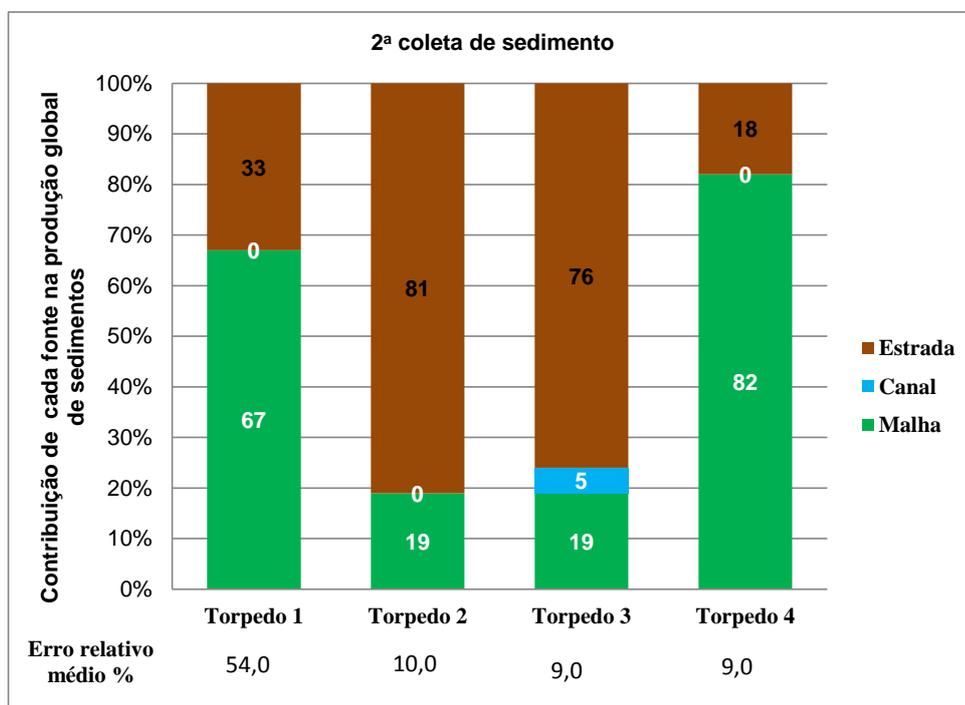


Figura 6. Contribuição relativa das áreas de estrada, canal e malha de amostragem na produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, Santa Maria, RS, para a segunda coleta de sedimento em suspensão.

Para a primeira coleta de sedimentos o modelo determinou uma contribuição na produção global de sedimentos de 100% da malha. Nessa situação não se pode fazer uma análise do resultado, pois o erro (27%) foi mais que 15%. Uma possível explicação para tal fato está atrelada principalmente ao baixo número de amostras coletadas. O ponto T2 apresentou contribuição maior das estradas (81%) na segunda coleta em relação a primeira (66%) e não apresentou contribuição do canal. Segundo Wasson et al. (2013), erosão em canal em bacias hidrográficas pode ser uma fonte importante de erosão, porém, a sua quantificação não é simples. Esse ponto se concentra em uma posição na bacia em que o Rio Vacacaí-Mirim se encontra mais conservado, onde as margens se apresentam em melhores condições e são observados pontos isolados de assoreamento. As áreas de preservação permanente (APPs) tem uma papel importante nessa parte da bacia se mantendo ainda na sua maior parte dentro da legislação, apesar das propriedades existentes como sítios (SAMUEL-ROSA et al., 2011), muitas vezes apresentam construções civis próximas da margem do rio. Segundo Miguel (2010), os conflitos de uso das terras se concentram mais próximos ao reservatório da CORSAN onde o uso antrópico é mais denso (MIGUEL et al., 2011), com problemas de ocupação (GOLDANI e CASSOL, 2008).

Outra explicação para essa análise diz respeito aos solos da bacia. A sub-bacia da qual o ponto T2 coletou os sedimentos tem o predomínio de associações de solos como Cambissos-Neossolos e em maior parte Argissolos Bruno-Acinzentados (MIGUEL et al., 2011). A ausência de Neossolos Flúvicos próximo as margens do rio faz que estas sejam mais estáveis visto da característica de instabilidade destes tipos de solos ainda mais quando formados a partir de materiais de origem como arenitos.

O ponto de coleta T3 apresentou contribuição somente da malha na primeira coleta e de 19% na segunda coleta com o aumento da contribuição das estradas numa magnitude de 76%. Esse local engloba a maior quantidade de estradas, comparado aos demais, que drenam a água das chuvas diretamente para as drenagens ou estradas com ausência de pontes onde se dá a ligação direta entre as estradas e os canais fluviais. O fato da grande variabilidade temporal pode ser explicado por um regime pluviométrico abaixo da média que ocorreu após a

instalação dos amostradores (Torpedos) fazendo com que o material que fosse coletado não tivesse tanto a característica da fonte estrada (Tabela 1).

As estradas são uma importante fonte de produção de sedimentos dentro da bacia hidrográfica, por isso merecem atenção. Em trabalho realizado por Minella et al. (2007), os autores encontraram que as estradas, apesar de ocuparem uma área 25 vezes menor que a das lavouras, contribuíram com um terço da produção de sedimentos. Podem ser apontadas como causas desse impacto a falta de planejamento da alocação das estradas na bacia (declividade acentuada e grande comprimento), a composição inadequada do material, a baixa frequência de manutenção e a ligação direta entre as estradas e a rede fluvial. Sendo assim, como as estradas representam um componente estático da paisagem agrícola numa bacia hidrográfica, pela sua contribuição na geração de sedimentos, o planejamento de alocação delas é primordial em programas de mitigação de transferência de sedimentos (COLLINS, et al., 2010).

Finalmente, o ponto T4, apresentou contribuição maior da malha (82%) na segunda coleta em relação a primeira (77%) e contribuição menor de estradas (8%) para a primeira coleta comparada com a segunda coleta (18%). A medida que o Rio Vacacaí-Mirim se aproxima do reservatório da CORSAN aumentam os problemas relacionados ao uso da terra, assoreamento das margens e falta de manutenção de APPs. Apesar da má conservação das margens, a contribuição das estradas se mostrou em caráter pouco significativo neste ponto. Um fato importante a constar é que o ponto T4 engloba toda a variabilidade da bacia relacionada as fontes de produção de sedimentos onde a malha provem basicamente de Argissolos Bruno-Acinzentados (Tabela 2) dando assim a característica de instabilidade relacionada a processos erosivos que ocorrem nesses solos. Isso fica evidente, pela formação de erosão em sulcos e até mesmo princípios de voçorocas nessa área. Por mais que o ponto T4, ao contrário dos demais, englobe as áreas onde são encontrados Neossolos Flúvicos, não foi possível identificar contribuição do canal exceto para os 15% da primeira coleta ficando mais uma vez evidente a instabilidade dos Argissolos Bruno-Acinzentados aos processos de transporte de sedimentos.

5.1.3 Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica

Na análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (TG), todas amostras tanto das fontes como do sedimento em suspensão, seguem um padrão semelhante sendo portanto, plotadas amostras de cada fonte para fins de exemplificação do procedimento conforme figura 7. As amostras apresentam reflexos de reação endotérmica devido à presença de água ligada a superfície das partículas coloidais, com endotermas entre 30 e 130 °C. A partir da endoterma 130 °C e do primeiro evento de desidroxilação, a 230 °C, foi verificada a presença de minerais 2:1 em todas as amostras. Os termogramas apresentados, bem como em todos das demais amostras, não apresentaram presença de gibbsita.

A desidroxilação da caulinita ocorre na reação endotérmica em 480 °C e é completada em aproximadamente 600 °C podendo ser verificada em todas as amostras analisadas. Esse pico endotérmico de reação da caulinita é devido à transformação das hidroxilas internas. O pico endotérmico que ocorre na temperatura de 700 °C não faz parte da reação da caulinita e por não se apresentar em todas as amostras, esse evento não foi caracterizado.

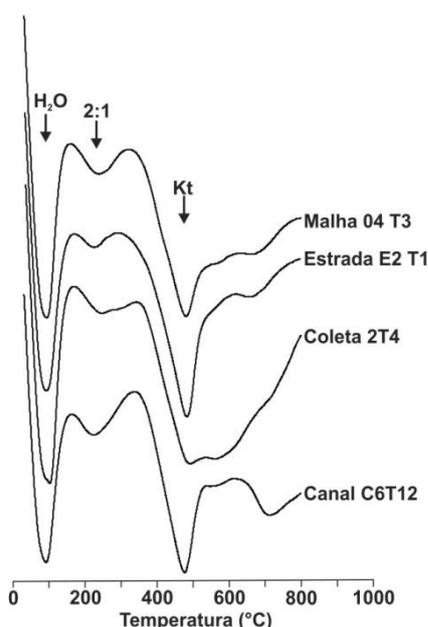


Figura 7. Termogramas representativos à análise térmica diferencial das amostras estudadas. H₂O: água adsorvida na superfície dos minerais, 2:1; argilominerais do tipo 2:1; Kt: caulinita.

Ocorreu uma variação entre a temperatura dos picos de reação para cada uma das amostras (Tabela 10). Isso é devido à diferença no grau de cristalinidade dos minerais (KITAGAWA e MOLLER, 1979). Como a cristalinidade não se comporta como uma variável contínua e sim como uma variável discreta, o valor de temperatura do pico de reação não foi testado como variável traçadora.

Tabela 10. Valores de perda de massa, pico da reação e quantidade dos minerais das análises realizadas no ATD em amostras de argila desferrificada.

Amostras ⁽¹⁾	PM 2:1 ⁽²⁾ mg	PM Kt	Kt ⁽³⁾ % do mineral	2:1	Pico Kt ⁽⁴⁾ °C	Pico 2:1	PM DCB ⁽⁵⁾ %
T1 227	0,365	1,531	65	50	484,60	210,07	13
T1 268	0,650	2,076	87	67	492,91	194,85	14
T1 C 6	0,498	1,681	77	59	486,88	220,56	16
T1 E 2	0,241	1,787	74	57	482,61	222,90	14
T1 E 3	0,237	1,714	73	57	485,49	253,71	12
T2 139	0,405	1,611	67	52	485,46	231,25	10
T2 169	0,244	1,538	67	52	482,56	240,50	11
T2 C 6	0,559	1,757	80	62	477,71	223,72	9
T2 C 7	0,155	1,375	65	50	477,25	247,60	16
T2 E 6	0,182	1,974	87	68	487,67	242,15	14
T2 E 7	0,324	1,732	72	56	484,20	234,07	12
T3 4	0,314	1,512	72	55	478,93	235,02	16
T3 12	0,344	1,430	66	51	480,85	213,23	13
T3 C 5	0,533	1,757	78	60	484,33	217,05	14
T3 C 6	0,122	1,580	77	60	479,75	157,45	3
T3 E 2	0,165	1,390	65	50	480,23	233,34	12
T3 E 4	0,168	1,387	67	52	489,33	145,87	9
T3 E 7	0,308	1,156	55	43	484,58	260,72	2
T4 44	0,121	1,449	64	49	478,83	235,80	11
T4 60	0,245	1,361	61	47	482,85	316,99	10
T4 C 2	0,486	1,653	72	56	482,46	229,04	7
T4 C 4	0,762	1,574	76	59	495,61	231,91	12
T 4_1 ⁽⁶⁾	0,611	1,164	54	41	496,95	216,76	7
T 4_2	0,237	1,300	63	49	489,02	240,84	5

⁽¹⁾ As amostras com números inteiros (227), letras C e letra E, correspondem as amostras das fontes malha, canal e estradas respectivamente. ⁽²⁾ PM 2:1 é a perda de massa dos minerais 2:1; PM Kt é a perda de massa da caulinita. ⁽³⁾ valor correspondente a quantidade do mineral encontrado na amostra. ⁽⁴⁾ Temperatura do pico da reação de cada mineral. ⁽⁵⁾ Perda de massa das amostras após tratamento com DCB. ⁽⁶⁾ Amostras do torpeda 4 nas duas coletas.

A perda de massa após o tratamento com DCB teve variação significativa. Esse fato está atrelado à remoção dos óxidos de ferro com alta cristalinidade, os quais apresentam uma variação evidente em seus teores. Já a perda de massa, específica de cada mineral (2:1 e Kt), segue a dinâmica do grau de cristalinidade que pode variar em cada amostra visto que elas são provenientes de diferentes fontes e tipos de solos, bem como diferentes materiais de origem. A caulinita (Kt) é o

mineral que predomina em todas as amostras, justamente por ser o mineral mais abundante em todos os solos brasileiros, mesmo em solos menos intemperizados. De acordo com Clemente e Azevedo (2007) a formação da caulinita se dá a partir de vários minerais como, micas, plagioclásios e feldspatos alcalinos.

5.1.4 Análise de Difração de Raios-X

Os difratogramas de raios-X para argilas com óxidos de ferro concentrados das amostras de sedimento e de solo das fontes mostram a identificação dos óxidos de ferro nos planos Gt(111), Gt(110), Hm (110) e Hm(012) (Figura 8). Nas amostras de solos das fontes e sedimentos analisadas, (Tabela 11) o mineral hematita predominou sobre a goethita.

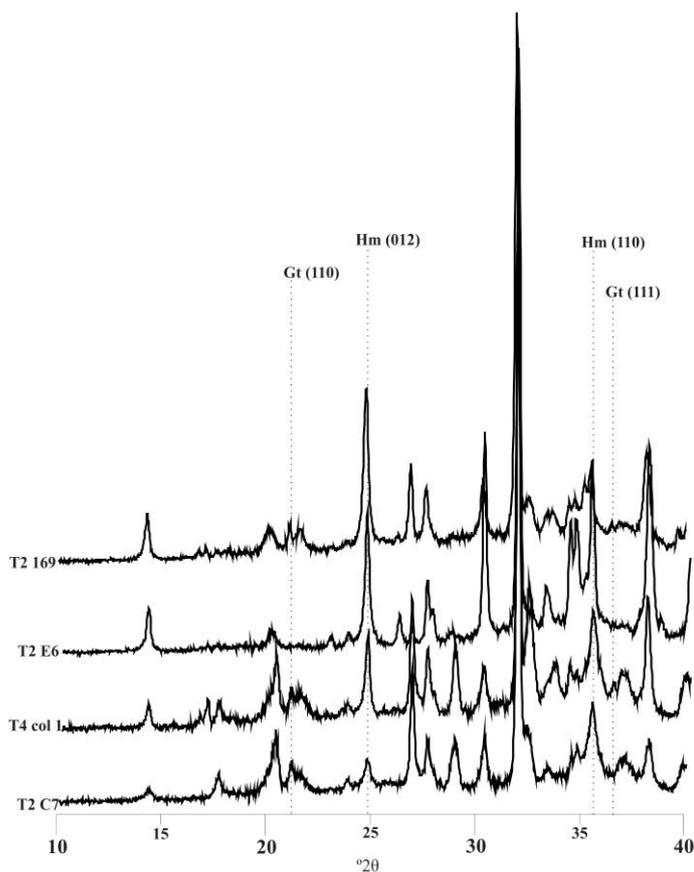


Figura 8. Difratogramas de raios-X de argila tratada com soluções de NaOH 5,0 mol L⁻¹, para concentração de óxidos de ferro.

Tabela 11. Composição mineralógica de óxidos de ferro da fração argila, Hematita (Hm), Goethita (Gt), relação (Gt/Gt+Hm) e substituição isomórfica de Fe por Al na hematita e na goethita.

Amostras ⁽¹⁾	Gt/Gt+Hm ⁽²⁾	Substituição Isomórfica ⁽³⁾		FeGt	Gt	FeHm	Hm
		Gt	Hm				
		cmol _c .mol ⁻¹ Al					
		DRX		% Dissolução química ⁽⁴⁾			
T1 227	0,521	17,3	11,0	1,28	2,03	1,17	1,67
T1 268	0,056	13,2	11,0	0,27	0,44	4,61	6,59
T1 C 6	0,274	28,2	11,0	0,67	1,06	1,77	2,53
T1 E 2	0,028	21,7	7,3	0,16	0,25	5,55	7,94
T1 E 3	0,052	33,4	11,0	0,15	0,24	2,72	3,89
T2 139	0,459	10,9	11,0	0,28	0,44	0,33	0,47
T2 169	0,039	17,3	11,0	0,04	0,06	0,91	1,30
T2 C 6	0,170	32,4	6,0	0,38	0,60	1,84	2,63
T2 C 7	0,331	23,8	4,8	0,60	0,95	1,21	1,73
T2 E 6	0,057	30,2	8,5	0,18	0,29	3,03	4,33
T2 E 7	0,213	19,4	11,0	0,16	0,25	0,58	0,83
T3 4	0,037	19,4	11,0	0,05	0,07	1,20	1,72
T3 12	0,315	30,4	3,6	0,58	0,92	1,26	1,80
T3 C 5	0,499	21,4	11,0	1,08	1,71	1,08	1,55
T3 C 6	0,582	14,9	11,0	1,68	2,67	1,21	1,73
T3 E 2	0,320	23,4	11,0	0,43	0,68	0,91	1,30
T3 E 4	0,077	25,8	11,0	0,24	0,38	2,87	4,11
T3 E 7	0,213	28,2	11,0	0,07	0,11	0,25	0,36
T4 44	0,438	15,3	11,0	0,03	0,05	0,04	0,06
T4 60	0,270	23,8	8,5	0,46	0,73	1,24	1,77
T4 C 2	0,238	25,8	11,0	0,82	1,31	2,64	3,77
T4 C 4	0,238	31,9	9,7	0,31	0,49	1,00	1,42
T 4_1 ⁽⁵⁾	0,182	13,2	11,7	0,53	0,83	2,36	3,37
T 4_2	0,203	14,9	11,7	0,49	0,77	1,91	2,74

⁽¹⁾ As amostras com números inteiros (227), letras C e letra E, correspondem as amostras das fontes malha, canal e estradas respectivamente. ⁽²⁾ relação obtida através das análises de DRX. ⁽³⁾ substituição isomórfica na hematita segundo Schwertmann et al. (1979) e na goethita segundo Schulze (1984). ⁽⁴⁾ porcentagem de Fe na hematita (FeHm), porcentagem de Fe na goethita (FeGt) e porcentagem dos minerais Hm e Gt na amostra. ⁽⁵⁾ Amostras do torpeda 4 nas duas coletas.

O maior conteúdo de hematita nas amostras pode ser resultados da atuação do fator de formação clima, que na região central do Estado do RS favorece mais a formação da hematita em detrimento a goethita (PEDRON et al., 2012). Mesmo com essas características algumas amostras (T1 227, T3 C5 e T3 C6) apresentam conteúdo maior de goethita. Esse fato se deve ao alto conteúdo de matéria orgânica já que as amostras são provenientes dos primeiros 20 cm do solo, ocorrendo a complexação do ferro, baixando a atividade do Fe³⁺ na solução, favorecendo assim a precipitação da goethita. Outra hipótese esta relacionada a gênese de óxidos de ferro que é fortemente influenciada pelo fator relevo principalmente em áreas de encosta. A drenagem da água para as partes mais baixas da paisagem promove a

concentração de ácidos húmicos, principalmente daqueles de baixo peso molecular, o que favorece a formação da goethita (GHIDIN et al., 2006). Nas cotas mais altas do relevo, com menor umidade e maior temperatura, a formação preferencial é da hematita, devido à facilidade de desidratação da ferrihidrita (KÄMPF e SCHWERTMANN, 1983).

A substituição isomórfica (SI) do Fe^{3+} por Al^{3+} na estrutura afeta a cristalinidade do mineral causando a contração na cela unitária devido ao menor raio iônico do Al^{3+} em relação ao Fe^{3+} (INDA et al., 2005) determinando uma maior estabilidade dos cristais às reações redutivas, devido ao estado de oxidação constante do alumínio. A estimativa da SI na hematita mostrou uma variação de 11,7 a 3,6 $\text{cmol}_c.\text{mol}^{-1} \text{Al}^{3+}$ e na goethita de 33,4 a 13,2 $\text{cmol}_c.\text{mol}^{-1} \text{Al}^{3+}$ estando estes valores dentro do intervalo geralmente esperado tanto para a hematita como para a goethita (INDA et al., 2005). Valores de SI na goethita acima de 15 $\text{cmol}_c.\text{mol}^{-1} \text{Al}^{3+}$ podem ser considerados altos já que o provável limite tolerado pela estrutura da goethita é de 33 $\text{cmol}_c.\text{mol}^{-1} \text{Al}^{3+}$ (CORREA et al., 2008; SCHWERTMANN e TAYLOR, 1989). São observados em ambientes com baixa atividade do silício (Si) e alta de Al, baixo pH e não hidromorfismo. O fato da SI por Al^{3+} na goethita apresentar melhor relação com o meio do que a hematita é devido a sua formação via solução, portanto, mais sujeita a contaminações do meio.

5.1.5 Potencial discriminante das fontes – geoquímicas + mineralogia

A aplicação do teste estatístico não-paramétrico, denominado teste-H ou Kruskal-Wallis em nível de significância de 90 % ($H_{\text{crítico}} = 4,60$) selecionou 11 variáveis das 36 analisadas (Tabela 12). Da análise dos elementos geoquímicos e da dissolução seletiva das formas cristalinas e mal cristalizadas dos óxidos, foram selecionadas 9 variáveis, sendo elas, Ba, La, Mn_{EPA} , Sr, Ti, Na, P, Mn_{dcb} e COT. As variáveis mineralógicas selecionadas foram Kt e Gt.

A capacidade discriminante das variáveis Kt e Gt pode estar relacionada com a questão de estabilidade de complexos organo-minerais. A goethita (Gt) apresenta menor tamanho de cristal e maior área superficial específica do que a hematita (Hm) e maior concentração de grupos funcionais (-OH) na superfície (DICK e SCHWERTMANN, 1996; INDA e KÄMPF, 2005; INDA et al. 2007). Assim, a Gt

possui uma maior efetividade na estabilidade de complexos organo-minerais que a Hm podendo assim, se tornar mais estável no sistema apresentando uma capacidade traçadora mais significativa.

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 13). As variáveis foram testadas na análise de variância e aquelas que apresentaram menores valores de Λ^* foram selecionadas para o modelo de classificação. O conjunto de variáveis selecionadas reduziu o erro para 17,6% onde que, o conjunto de variáveis explica, aproximadamente, 83% das diferenças entre as fontes.

Tabela 12. Resultados do teste de *Kruskal-Wallis* para cada variável (geoquímica e dissolução seletiva) e teor de cada variável no solo das fontes.

Variável	Teste <i>Kruskal-Wallis</i>		Concentração média nas fontes (g.kg ⁻¹)		
	<i>H</i> ⁽¹⁾	<i>p</i> ⁽²⁾	Estrada	Canal	Malha
Alumínio (Al)	1,971	0,3731	37,737	23,138	23,737
Ferro (Fe)	2,969	0,2266	30,549	28,663	22,926
Cálcio (Ca)	2,988	0,2245	1,722	2,562	1,613
Bário (Ba)	5,316	0,0701*	0,096	0,184	0,141
Magnésio (Mg)	2,054	0,3580	0,096	0,184	0,141
Lantânio (La)	8,416	0,0149*	0,021	0,027	0,018
Lítio (Li)	1,646	0,4390	0,000	0,001	0,001
Manganês (Mn)	6,037	0,0489*	0,019	0,017	0,013
Níquel (Ni)	1,590	0,4515	0,016	0,009	0,008
Estrôncio (Sr)	7,315	0,0258*	0,024	0,057	0,035
Zinco (Zn)	3,626	0,1631	0,017	0,024	0,021
Potássio (k)	2,759	0,2517	2,078	1,690	1,917
Titânio (Ti)	6,516	0,0385*	2,938	4,441	3,686
Chumbo (Pb)	1,901	0,3864	0,007	0,010	0,009
Cobre (Cu)	1,809	0,4047	0,047	0,045	0,034
Cromo (Cr)	1,397	0,4972	0,016	0,011	0,011
Sódio (Na)	8,264	0,0160*	0,194	0,202	0,105
Berílio (Be)	3,384	0,1847	0,002	0,002	0,001
Cobalto (Co)	3,448	0,1783	0,015	0,021	0,019
Fósforo (P)	6,269	0,0435*	0,156	0,266	0,293
Silício (Si)	0,936	0,6261	0,156	0,135	0,138
Vanádio (V)	2,568	0,2769	0,130	0,150	0,112
Carbono (COT)	7,394	0,0248*	9,011	15,622	18,287
Dissolução seletiva ⁽³⁾					
Fe (DCB)	2,081	0,3532	24,694	23,233	17,167
Fe (oxa)	1,660	0,4360	2,014	3,860	2,316
Mn (DCB)	7,857	0,0197*	0,234	0,802	0,714
Mn (oxa)	1,050	0,5913	0,076	0,542	0,258
Al (DCB)	1,377	0,5021	4,107	2,392	2,606
Al (oxa)	3,972	0,1372	2,397	1,160	1,696
Mineralogia ⁽⁴⁾					
PM 2:1	3,909	0,1416	0,0002	0,0004	0,0003
PM Kt	1,157	0,5607	0,0016	0,0016	0,0016
2:1	3,504	0,1734	71,671	139,375	98,852
Kt	4,724	0,0942*	627,893	666,979	600,734
PM DCB	0,116	0,9432	106,934	111,675	122,873
Gt	6,620	0,0134*	3,134	12,568	5,925
Hm	1,234	0,5393	32,493	21,920	19,220

⁽¹⁾Valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado - $H_{\text{crítico}}(90\%; 2 \text{ gl}) = 4,60$; ⁽²⁾Probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrado; * valores de $p < 0,10$. ⁽³⁾ Teores de elementos extraídos com DCB e teores dos elementos extraídos com Oxalato de Amônio. ⁽⁴⁾ PM 2:1 perda de massa dos minerais 2:1; PM Kt perda de massa da caulinita. 2:1 valor correspondente a quantidade de minerais 2:1 encontrados na amostra. Kt valor correspondente a quantidade de caulinita (Kt) encontrada na amostra. PM DCB perda de massa das amostras após tratamento com DCB. Gt e Hm quantidade dos minerais Goethita (Gt) e Hematita (Hm) encontrados nas amostras das fontes.

Tabela 13. 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	COT	La	Na	Gt
Λ^* acumulado ⁽¹⁾	0,617	0,303	0,217	0,176

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

5.1.6 Classificação das amostras de sedimento em suspensão

Para correção dos efeitos de diluição do material grosseiro das fontes foi realizado o cálculo do fator de correção, sendo possível assim a comparação dos teores dos elementos químicos das fontes com os dos sedimentos em suspensão. Neste estudo foi considerado como material não reativo a fração maior que 150 μm . Para o fator de correção foi utilizada a porcentagem de diferença entre as frações 150 e 63 μm , que segundo Horowitz (1991) seriam as partículas primárias, corrigindo assim as concentrações químicas das fontes por meio dessa proporção. A análise de classificação das fontes foi realizada comparando as variáveis com seus teores normais e após serem corrigidas pelo fator de correção.

O modelo de classificação das amostras de sedimentos em suspensão se mostrou satisfatório para avaliação de contribuição das fontes (Tabelas 14 e 15). A inclusão das variáveis mineralógicas se mostrou eficiente para o modelo de predição. Não somente pelo fato da diminuição do erro relativo médio, mas também pela maior coerência dos resultados obtidos quando foi testada a composição geoquímica + composição mineralógica. A partir da análise do erro atribuído a cada variável ficou evidente que ao suprimir a variável mineralógica Gt da análise, usando somente a composição geoquímica, ocorreu um aumento no erro relativo e um resultado pouco coerente com a situação da bacia, visto que o modelo não detectou como fonte de produção de sedimentos as estradas. Com a composição geoquímica a contribuição da malha foi 24,4 e 20,9% e dos canais 75,6 e 79,1% para primeira e segunda coleta de sedimentos respectivamente. O baixo número de variáveis selecionadas pela análise discriminante (La, Na, COT e Gt), o uso de variáveis com elevado grau de incerteza como COT e Na, e a retirada de uma variável que contribui pouco para o erro relativo médio (Gt) podem ser as causas para as

distorções nos resultados entre as comparações da composição geoquímica e composição geoquímica + composição mineralógica.

O modelo de classificação foi eficiente na minimização da função objetiva usando as variáveis da análise discriminante para ambas as coletas de sedimento em suspensão. Os erros ficaram abaixo de 15% que é o limite aceitável para tal verificação. Para a composição geoquímica + composição mineralógica foi verificado o predomínio da contribuição da fonte canal (36,0% e 35,5%), seguido da malha (33,7% e 33,5%) e estradas (30,3% e 30,9%) para primeira e segunda coleta de sedimento.

O local de coleta de amostras de sedimento em suspensão foi instalado no exutório da bacia, portanto, a análise engloba toda a variabilidade e dinâmica de transporte de sedimentos da área. Os resultados condizem com a situação da área onde são evidentes os processos de assoreamento do Rio Vacacaí-Mirim como desestabilização de margens e mudança no curso do seu leito.

Tabela 14. Contribuição relativa das áreas de estrada, canal e malha produção de sedimentos usando variáveis geoquímicas + variáveis mineralógicas.

Composição geoquímica + composição mineralógica		1ª coleta	2ª coleta
		-----%	
Malha		33,7	33,5
Canal		36,0	35,5
Estrada		30,3	30,9
ERM		12,3	8,7
	Ba		
	La	0,1	0,1
	Mn total		
	Sr		
	Ti		
Erro relativo por variável	Na	15,9	17,7
	P		
	Mn DCB		
	COT	32,8	16,7
	Kt		
	Gt	0,3	0,3

Tabela 15. Contribuição relativa das áreas de estrada, canal e malha na produção de sedimentos usando variáveis geoquímicas.

		Composição geoquímica	
		1ª coleta	2ª coleta
		-----%-----	
	Malha	24,4	20,9
	Canal	75,6	79,1
	Estrada	0,0	0,0
	ERM	15,2	10,4
	Ba		
	La	0,0	0,1
	Mn total		
Erro relativo por variável	Sr		
	Ti		
	Na	16,1	17,2
	P		
	COT	29,5	14,1

5.2 Segunda etapa – abordagem pedológica Fingerprinting

5.2.1 Pressuposições

Nesta etapa realizou-se uma abordagem diferenciada do uso do método fingerprinting tendo por base as informações da pedologia como, distribuição dos solos na bacia hidrográfica, uso da terra e variabilidade geológica. Desta maneira, procurou-se minimizar alguns possíveis desvios de avaliação do modelo de predição:

1. O modelo não apresentou resultados confiáveis para o primeiro local de coleta de sedimentos (T1). Isso pode estar relacionado a escala de uso, visto, o pequeno número de amostras usadas para compor o modelo de variáveis que discrimina as fontes de sedimentos.
2. A grande variabilidade espacial (entre os pontos de coletas) e temporal (entre 1ª e 2ª coletas).
3. Determinação de variáveis mineralógicas em um número reduzido de amostras para avaliação da contribuição das fontes com o conjunto de variáveis pedogeoquímicas + mineralógicas.
4. Uso de variáveis ambientalmente instáveis como COT, Na, K e P na composição dos modelos de predição.

5. Variáveis referentes a fonte malha com características geológicas diferentes (sedimentar e vulcânica).

5.2.2 Potencial discriminante das fontes

Para a etapa de discriminação das fontes foram utilizadas 36 variáveis (pedogeoquímicas + mineralógicas) para testar o potencial discriminante das variáveis com 3 fontes (estradas, canais e malha) (Tabela 16) e posteriormente com 2 fontes (superficiais e subsuperficiais) (Tabela 17). Através da aplicação do teste estatístico não-paramétrico, denominado teste- H ou Kruskal-Wallis em nível de significância de 90% ($H_{\text{crítico}} = 4,60$ para 3 fontes e $H_{\text{crítico}} = 2,71$ para duas fontes), somente algumas variáveis foram selecionadas para ambos os conjuntos de fontes.

Variáveis como COT, Na, K Ca e P, apesar de apresentarem capacidade discriminante não foram utilizadas pois são muito instáveis no sistema e pelo grande enriquecimento que pode ser encontrado no sedimento em suspensão (MINELLA et al., 2009a). Outro fato é que as concentrações desses elementos são potencialmente influenciadas pelo manejo do solo, sendo assim, como a bacia não apresenta extensas áreas de lavoura, esses elementos podem gerar incoerência nos resultados do modelo. Já variáveis provenientes da dissolução seletiva, como Fe_{oxa} , Fe_{dcb} , Mn_{oxa} , Mn_{dcb} , Al_{oxa} , Al_{dcb} , as quais evidenciam fatores de intemperismo e reações de oxidação-redução, e geoquímicas como Ba e Cr, mesmo sendo selecionadas pelo teste H , não foram utilizadas como variáveis traçadores, por se encontrarem fora dos limites em que os fatores de correção puderam corrigir.

Outro ponto crucial desta etapa foi a exclusão das amostras referentes a malha, as quais tinham material de origem vulcânico. O uso de amostras derivadas por dois materiais de origem diferentes poderia acarretar em incertezas no modelo de predição. Esse fato é devido a grande variação química e mineralógica de amostras provenientes destes dois substratos rochosos. A orientação correta seria utilizar os materiais de origem como fontes de produção de sedimentos, porém, o número pequeno de amostras (5) de material vulcânico inviabiliza a análise.

Tabela 16. Resultados do teste de *Kruskal-Wallis* para cada variável e média do teor de cada variável no solo para o primeiro conjunto de fontes.

Variável	Teste <i>Kruskal-Wallis</i>		Concentração média nas fontes (g.kg ⁻¹)		
	<i>H</i> ⁽¹⁾	<i>p</i> ⁽²⁾	Estrada	Canal	Malha
Alumínio (Al)	14,575	0,0007*	37,737	23,138	23,737
Ferro (Fe)	17,722	0,0001*	30,549	28,663	22,926
Cálcio (Ca)	13,921	0,0009*	1,722	2,562	1,613
Bário (Ba)	14,784	0,0006*	0,096	0,184	0,141
Magnésio (Mg)	13,019	0,0015*	0,096	0,184	0,141
Lantânio (La)	13,108	0,0014*	0,021	0,027	0,018
Lítio (Li)	16,322	0,0003*	0,000	0,001	0,001
Manganês (Mn)	6,751	0,0342*	0,019	0,017	0,013
Níquel (Ni)	8,832	0,0121*	0,016	0,009	0,008
Estrôncio (Sr)	27,605	0,0000*	0,024	0,057	0,035
Zinco (Zn)	13,423	0,0012*	0,017	0,024	0,021
Potássio (k)	0,6564	0,7202	2,078	1,690	1,917
Titânio (Ti)	19,245	0,0001*	2,938	4,441	3,686
Chumbo (Pb)	17,399	0,0002*	0,007	0,010	0,009
Cobre (Cu)	12,540	0,0019*	0,047	0,045	0,034
Cromo (Cr)	6,288	0,0431*	0,016	0,011	0,011
Sódio (Na)	17,661	0,0001*	0,194	0,202	0,105
Berílio (Be)	20,341	0,0000*	0,002	0,002	0,001
Cobalto (Co)	8,083	0,0176*	0,015	0,021	0,019
Fósforo (P)	7,626	0,0221*	0,156	0,266	0,293
Silício (Si)	3,326	0,1895	0,156	0,135	0,138
Vanádio (V)	20,471	0,0000*	0,130	0,150	0,112
Carbono (COT)	27,946	0,0000*	9,011	15,622	18,287
Dissolução seletiva⁽³⁾					
Fe (DCB)	16,838	0,0002*	24,694	23,233	17,167
Fe (oxa)	7,759	0,0207*	2,014	3,860	2,316
Mn (DCB)	8,630	0,0134*	0,234	0,802	0,714
Mn (oxa)	2,828	0,2431	0,076	0,542	0,258
Al (DCB)	1,754	0,4160	4,107	2,392	2,606
Al (oxa)	0,727	0,6949	2,397	1,160	1,696
Mineralogia⁽⁴⁾					
PM 2:1	3,909	0,1416	0,0002	0,0004	0,0003
PM Kt	1,157	0,5607	0,0016	0,0016	0,0016
2:1	3,504	0,1734	71,671	139,375	98,852
Kt	4,724	0,0942*	627,893	666,979	600,734
PM DCB	0,116	0,9432	106,934	111,675	122,873
Gt	6,620	0,0134*	3,134	12,568	5,925
Hm	1,234	0,5393	32,493	21,920	19,220

⁽¹⁾Valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado - $H_{\text{crítico}}(90\%; 2 \text{ gl}) = 4,60$; ⁽²⁾Probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrado; * valores de $p < 0,10$. ⁽³⁾ Teores de elementos extraídos com DCB e teores dos elementos extraídos com Oxalato de Amônio. ⁽⁴⁾ PM 2:1 perda de massa dos minerais 2:1; PM Kt perda de massa da caulinita. 2:1 valor correspondente a quantidade de minerais 2:1 encontrados na amostra. Kt valor correspondente a quantidade de caulinita (Kt) encontrada na amostra. PM DCB perda de massa das amostras após tratamento com DCB. Gt e Hm quantidade dos minerais Goethita (Gt) e Hematita (Hm) encontrados nas amostras das fontes.

Tabela 17. Resultados do teste de *Kruskal-Wallis* para cada variável e média do teor de cada variável no solo para o segundo conjunto de fontes.

Variável	Teste <i>Kruskal-Wallis</i>		Concentração média nas fontes (g.kg ⁻¹)	
	<i>H</i> ⁽¹⁾	<i>p</i> ⁽²⁾	Subsuperficial	Superficial
Alumínio (Al)	14,542	0,0001*	30,438	23,737
Ferro (Fe)	10,018	0,0001*	29,606	22,926
Cálcio (Ca)	13,207	0,0003*	2,142	1,613
Bário (Ba)	4,312	0,0378*	0,140	0,141
Magnésio (Mg)	12,530	0,0004*	0,140	0,141
Lantânio (La)	10,239	0,0014*	0,024	0,018
Lítio (Li)	14,542	0,0001*	0,001	0,001
Manganês (Mn)	0,801	0,9774	0,018	0,013
Níquel (Ni)	8,562	0,0034*	0,013	0,008
Estrôncio (Sr)	11,870	0,0006*	0,041	0,035
Zinco (Zn)	5,436	0,0197*	0,021	0,021
Potássio (k)	0,299	0,5840	1,884	1,917
Titânio (Ti)	6,543	0,0105*	3,690	3,686
Chumbo (Pb)	0,721	0,3956	0,009	0,009
Cobre (Cu)	11,292	0,0008*	0,046	0,034
Cromo (Cr)	6,257	0,0124*	0,014	0,011
Sódio (Na)	17,407	0,0000*	0,198	0,105
Berílio (Be)	16,938	0,0000*	0,002	0,001
Cobalto (Co)	4,795	0,0285*	0,018	0,019
Fósforo (P)	1,283	0,2573	0,211	0,293
Silício (Si)	3,149	0,0760*	0,146	0,138
Vanádio (V)	15,124	0,0001*	0,140	0,112
Carbono (COT)	5,793	0,0161*	12,317	18,287
Dissolução seletiva⁽³⁾				
Fe (DCB)	14,978	0,0001*	23,964	17,167
Fe (oxa)	2,252	0,1334	2,937	2,316
Mn (DCB)	0,487	0,4849	0,518	0,714
Mn (oxa)	0,643	0,4223	0,309	0,258
Al (DCB)	1,219	0,2694	3,250	2,606
Al (oxa)	0,094	0,7590	1,779	1,696
Mineralogia⁽⁴⁾				
PM 2:1	3,909	0,1416	0,0003	0,0003
PM Kt	1,157	0,5607	0,0020	0,0016
2:1	3,504	0,1734	105,523	98,852
Kt	4,724	0,0942*	647,436	600,734
PM DCB	0,116	0,9432	109,305	122,873
Gt	6,620	0,0134*	7,8510	5,925
Hm	1,234	0,5393	27,207	19,220

⁽¹⁾Valor do teste de discriminação que se aproxima dos valores da distribuição qui-quadrado - $H_{\text{crítico}}(90\%; 1 \text{ gl}) = 2,71$; ⁽²⁾Probabilidade de que as fontes difiram entre si, segundo a distribuição qui-quadrado; * valores de $p < 0,10$. ⁽³⁾ Teores de elementos extraídos com DCB e teores dos elementos extraídos com Oxalato de Amônio. ⁽⁴⁾ PM 2:1 perda de massa dos minerais 2:1; PM Kt perda de massa da caulinita. 2:1 valor correspondente a quantidade de minerais 2:1 encontrados na amostra. Kt valor correspondente a quantidade de caulinita (Kt) encontrada na amostra. PM DCB perda de massa das amostras após tratamento com DCB. Gt e Hm quantidade dos minerais Goethita (Gt) e Hematita (Hm) encontrados nas amostras das fontes.

Foi realizada a determinação do parâmetro Wilk's Lambda (Λ^*) para avaliação dos resultados da análise de variância multivariada e determinar um único grupo de variáveis que otimiza a discriminação das fontes usando todo o conjunto de amostras (Tabela 18). As variáveis foram testadas na análise de variância e aquelas que apresentaram menores valores de Λ^* foram selecionadas para o modelo de classificação. As variáveis mineralógicas não fizeram parte da análise discriminante pelo fato de que a determinação das mesmas ocorreu em um número reduzido de amostras. Assim, levando em consideração o mesmo material de origem das amostras (sedimentar) foi possível extrapolar os resultados da mineralogia fazendo com que as variáveis que apresentaram capacidade discriminante (Kt e Gt) pudessem compor o modelo de predição.

Tabela 18. 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	5	6	7	8	9	10	11
Variável	V	Li	Al	Mn	Ni	Co	Mg	Fe	Pb	La	Cu
Λ^* acumulado ⁽¹⁾	0,300	0,287	0,276	0,276	0,275	0,273	0,273	0,272	0,273	0,266	0,260
Step	12	13	14	15							
Variável	Zn	Sr	Ti	Be							
Λ^* acumulado ⁽¹⁾	0,260	0,258	0,257	0,257							

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

O modelo de classificação foi composto por 15 variáveis pedogeoquímicas mais 2 variáveis mineralógicas e usado para avaliar a contribuição das fontes de produção de sedimentos nos 4 pontos de coletas da bacia, para os dois conjuntos de fontes. Como o valor de Λ^* é definido como a proporção da variabilidade total das fontes devido ao erro, o modelo de classificação apresenta 75% de toda a variabilidade das amostras da bacia ($\Lambda^* = 0,257$).

Através da análise discriminante e avaliação do parâmetro Wilk's Lambda foi possível identificar se as amostras das fontes foram classificadas corretamente (Tabela 19). A matriz de classificação mostra que a porcentagem de classificação foi superior a 78%. Os maiores erros de classificação foram da fonte estrada, devido ao fato de que esses locais geralmente recebem material alóctone que pode ser ora material superficial ora subsuperficial ou até mesmo material de origem (cascalho).

Tabela 19. Matriz de classificação das amostras e probabilidade de cada amostra pertencer às fontes.

Fonte	% correta	Malha	Canal	Estrada
Malha	81,4	22	3	2
Canal	87,0	2	27	2
Estrada	66,6	5	4	18
Total	78,8	29	34	22

⁽¹⁾ Locais de coleta de sedimento em suspensão identificados como Torpedos (T1, T2, T3 e T4).

5.2.3 Classificação das amostras de sedimento em suspensão

O modelo de classificação das amostras de sedimentos em suspensão não foi eficiente na minimização da função objetiva para o ponto T1, usando os dois conjuntos de fontes (Tabelas 20 e 21). Este fato está atrelado a escala de utilização do modelo, uma vez que o ponto T1 possui um pequeno número de amostras (20), as incertezas da análise e os erros são muito significativos, não permitindo assim tal interpretação. Para o primeiro conjunto de fontes (estrada, canal e malha) os pontos T2, T3 e T4 puderam ser analisados com exceção da 1ª coleta do ponto T3 onde o erro foi maior do que 15%. Esta primeira análise mostra o predomínio da fonte canal no ponto T2 (56,36% e 67,17%) para 1ª e 2ª coletas, seguido da estrada e por último malha. No ponto T3 a fonte estrada predomina na 2ª coleta (52,32%), isso podendo ser explicado devido ao fato que a maioria das estradas não pavimentadas se concentra na área de coleta de sedimento desse ponto.

Para o ponto T4 a malha predomina como fonte de produção de sedimentos (56,33% e 47,02%) para 1ª e 2ª coletas. De acordo com a descrição para esse ponto na primeira etapa do estudo, a medida que o Rio Vacacaí-Mirim se aproxima do reservatório da CORSAN aumentam os problemas relacionados ao uso da terra, assoreamento das margens e falta de manutenção de APPs. É importante também salientar que o ponto T4 engloba toda a variabilidade da bacia relacionada as fontes de produção de sedimentos onde a malha provem basicamente de Argissolos Bruno-Acinzentados (MIGUEL et al., 2011) dando assim a característica de instabilidade relacionada a processos erosivos que ocorrem nesses solos.

Tabela 20. Contribuição relativa das fontes estrada, canal e malha na produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, Santa Maria, RS.

	Amostrador T2		Amostrador T3		Amostrador T4	
variáveis pedogeoquímicas						
	1ª coleta	2ª coleta	1ª coleta	2ª coleta	1ª coleta	2ª coleta
	-----%					
Malha	13,41	0,00	30,06	22,64	56,33	47,02
Estrada	30,23	32,83	0,03	52,32	7,55	8,04
Canal	56,36	67,17	69,91	25,04	36,12	44,94
ERM ⁽¹⁾	10,91	9,56	16,18	10,80	12,36	8,88
variáveis pedogeoquímicas + variáveis mineralógicas						
	-----%					
Malha	----	----	----	----	57,43	48,55
Estrada	----	----	----	----	6,40	12,07
Canal	----	----	----	----	36,17	39,38
ERM	----	----	----	----	12,58	8,53

⁽¹⁾ Erro relativo médio

Tabela 21. Contribuição relativa das fontes subsuperficiais e superficiais na produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, Santa Maria, RS.

	Amostrador T2		Amostrador T3		Amostrador T4	
variáveis pedogeoquímicas						
	1ª coleta	2ª coleta	1ª coleta	2ª coleta	1ª coleta	2ª coleta
	-----%					
Superficial	14,92	0,00	15,60	54,43	56,58	47,08
Subsuperficial	85,08	100,0	84,40	45,57	43,42	52,92
ERM ⁽¹⁾	10,89	10,14	14,88	12,58	12,46	9,59
variáveis pedogeoquímicas + variáveis mineralógicas						
	-----%					
Superficial	----	----	----	----	55,75	45,88
Subsuperficial	----	----	----	----	44,25	54,12
ERM	----	----	----	----	13,43	9,36

⁽¹⁾ Erro relativo médio

Em um segundo momento, quando foram incluídas as variáveis mineralógicas para ambos os conjuntos de fontes, não houve diferença significativa na determinação da contribuição relativa de cada uma das fontes de produção de sedimentos. Esse resultado pode ser devido a inclusão de somente duas variáveis

mineralógicas no modelo (Kt e Gt). As demais variáveis mineralógicas não apresentaram capacidade discriminante nas condições testadas.

Já para o segundo conjunto de fontes (superficial e subsuperficial) com exceção novamente do ponto T1, todos os demais apresentaram erros menores do que os valores críticos. O ponto T2 apresenta predomínio de fonte subsuperficial em ambas as coletas (85,08% e 100%), resultados semelhantes ao encontrado no primeiro conjunto de fontes (Tabela 20) onde a maior proporção de sedimentos era proveniente de canais. No ponto T3 fica evidente a confiabilidade dos resultados visto que apresenta na 1ª coleta predomínio de fonte subsuperficial (84,40%), no entanto, para esse ponto ocorre uma maior variabilidade espacial, visto que, na 2ª coleta do ponto T2 não houve contribuição de fonte superficial e no ponto T3 para a 2ª coleta a contribuição foi de 54,43%. Ocorreu também uma acentuada variabilidade temporal onde, pode-se perceber a diferença entre 1ª coleta (15,60%) e 2ª coleta (45,57%) para fonte superficial. Analisando o ponto T4 é possível confirmar a coerência dos resultados. O resultado da contribuição da fonte subsuperficial (Tabela 21) é praticamente o somatório das fontes estrada e canais da análise anterior (Tabela 20).

Comparado com a primeira etapa, na qual foi realizada uma abordagem clássica do método fingerprinting, houve uma redução tanto na variabilidade temporal quanto espacial na análise de contribuição das fontes. Isso pode ser explicado pelo conjunto de variáveis que foi usado para compor o modelo de predição, que englobou a variabilidade de toda a bacia hidrográfica e não somente de uma sub-bacia separadamente. Levando em consideração as características da bacia hidrográfica de estudo, como a grande variabilidade em termos de classes de solos, relevo e uso da terra, em todas as sub-bacias estudadas (T1, T2, T3 e T4), que foi possível a adaptação de um único conjunto de variáveis para gerar o modelo de predição, o qual, refém toda variabilidade de área.

6. CONCLUSÕES

Foi possível identificar a contribuição de cada um dos conjuntos de fontes de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, exceto para o ponto T1. Para esse ponto a escala foi determinante no resultado, pelo baixo número de amostras referentes a essa sub-bacia.

Para ambas as abordagens do método fingerprinting, as maiores contribuições na produção de sedimentos provem da erosão superficial do solo. Sistemas de manejo adequados, manutenção da cobertura do solo, sistemas onde há o menor revolvimento possível do solo, têm resultado significativo na diminuição das taxas de produção de sedimentos na área.

A utilização de um único conjunto de variáveis para compor o modelo de identificação de fontes fez com que os resultados apresentados fossem mais coerentes e reduziu a variabilidade espacial e temporal da análise. A utilização de informações pedológicas para suprimir aquelas variáveis que geravam incertezas aos resultados foi preponderante na construção desse novo modelo aplicado para toda a bacia hidrográfica.

As estradas se apresentam como fonte potencial de erosão na bacia. Portanto a correta alocação e até mesmo pavimentação, levando em consideração a proximidade da cidade de Santa Maria – RS refletem importante impacto na redução da produção de sedimentos.

A adição de variáveis mineralógicas, teor de caulinita e teor de goethita, melhoraram os resultados, diminuindo os erros, na primeira abordagem. No entanto, usando somente um conjunto de variáveis para o modelo de predição não houve nenhuma mudança significativa nos resultados.

7. REFERÊNCIAS

BALLANTINE, D. J. et al. The content and storage of phosphorus in fine-grained channel bed sediment in contrasting low land agricultural catchments in the UK. **Geoderma**, v. 151, p. 141-149, 2009.

BARNARD, P. L. Integration of bed characteristics, geochemical tracers, current measurements, and numerical modeling for assessing the provenance of beach sand in the San Francisco Bay Coastal System. **Marine Geology**, v. 336, p. 120-145, 2013.

BERNARDES, N. **Bases geográficas do povoamento do estado do Rio Grande do Sul**. Ed. Ijuí: Unijuí, 1997. 147p.

BERNÁRDES, P. Geochemical and mineralogical characterization of surficial sediments from the Northern Rias: Implications for sediment provenance and impact of the source rocks. **Marine Geology**, v. 291-294, p. 63-72, 2012.

BIRD, G. et al. Quantifying sediment-associated metal dispersal using Pb isotopes: Application of binary and multivariate mixing models at the catchment-scale. **Environmental Pollution**, v. 158, p. 2158-2169, 2010.

BONUMÁ, N. B. **Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no Sul do Brasil**. 2011. 136 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

BORTOLUZZI E. C. et al. Contaminação de águas superficiais por agrotóxicos em função do uso do solo numa micro bacia hidrográfica de Agudo, RS. **Rev. Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 881–887, 2006.

BRASIL, Ministério da Agricultura. **Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul.** Recife: DNPEA-MA, 1973. 431 p.

CAITCHEON, G. G. Applying environmental magnetism to sediment tracing: Tracers in Hydrology. **IAHS Publication**, v. 215, p. 285–292, 1993.

CARVALHO, N. O. et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios.** Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

CLEMENTE, C. A.; AZEVEDO, A. C. Mineral weathering in acid saprolites from subtropical, Southern Brazil. **Scientia Agricola**, v. 64, p. 601-607, 2007.

COLEMAN, D. J.; SCATENA, F. N. Identification and evaluation of sediment sources. In: HADLEY, R. F. **Drainage basin sediment delivery.** Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, 1986. N, 159, p. 3-18.

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*, v. 408, p. 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**, v. 414, p. 301-317, 2012.

COLLINS, A. L. et al. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. **Catena**, Amsterdam, v. 29, p. 1-27, 1997.

COLLINS, A. L.; WALLING, D. E. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. **Journal of Hydrology**, v. 261, n. 1-4, p. 218-244, 2002.

CORREA, M. M. et al. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1017-1031, 2008.

CUI, Q. et al. Copper content in lake sediments as a tracer of urban emissions: Evaluation through a source–transport–storage model. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 2714-2725, 2010.

DALMOLIN, R.S.D. et al. **Levantamento semidetalhado de solos da microbacia do arroio Lino-Município de Agudo (RS)**. Relatório Técnico Programa RS-Rural/SAA-RS, Santa Maria: FATEC/UFSM, 2003. 84 p.

DICK, D.P; SCHWERTMANN, U. Microaggregates from oxisols and inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. **Geoderma**, Amsterdam, v.74, p.49-63, 1996.

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. **Rev. Bras. de Recursos Hídricos**, v. 9, p. 56-64, 2004.

DU, J. et al. Use of ⁷ Be, ²¹⁰ Pb and ¹³⁷ Cs tracers to the transport of surface sediments of the Changjiang Estuary, China. **Journal of Marine Systems**, v. 82, p. 286-294, 2010.

DULLIUS, M. **Vegetação e solos de uma floresta estacional do Rio Grande do Sul**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Revista atual, 1997. 212 p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Method 3050B**. Acid digestion of sediments, Sludges, and Soils, 1996.

ESTRANY, J. et al. An investigation of soil erosion and redistribution in a Mediterranean lowland agricultural catchment using caesium-137. **International Journal of Sediment Research**, v. 25, p. 1-16, 2010.

FERREIRA, A.B. et al. Análise do meio físico da sub-bacia do Rio Vacacaí-Mirim RS/Brasil. **Rev. Geográfica Acadêmica**, v. 3, n. 2, p. 28-34, 2009.

FUJIHARA, A. K. **Predição da erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento**. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

GHIDIN, A. A. et al. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, v. 30, p. 307-319, 2006.

GOLDANI, J. Z.; CASSOL, R. Ocupação antrópica e sócio-ambiental da microbacia do Rio Vacacaí-Mirim – RS. **Revista Geomática**, Santa Maria, v. 3. n. 1-2, p. 43-55, 2008.

GRIMLEY, D. A. Glacial and nonglacial sediment contributions to Wisconsin Episode loess in the central United States. **Geological Society of America Bulletin**, v. 112, p. 1475-1495, 2000.

GUZMÁN, G. et al. Evaluation of magnetic iron oxides as sediment tracers in water erosion experiments. **Catena**, Amsterdam, v. 82, p. 126-133, 2010.

HACK, C. et al. Análise tossociológica de um fragmento de oresta estacional decidual no município de Jaguari, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 1083-1091, 2005.

HANCOCK, G. R. et al. Soil properties and environmental tracers: A DEM based assessment in an Australian Mediterranean environment. **Geomorphology**, v. 183, p. 45-57, 2013.

HE, M.; ZHENG, H.; HUANG, X.; JIA, J. & LI, L. Yangtze River sediments from source to sink traced with clay mineralogy. **J. Asi. Earth Sci.**, 2012. (article in press). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.10.001>. Acessado em 15 de mar. de 2013.

HENSHAW, A. J. et al. Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. **Catena**. Amsterdam, v. 100, p. 107-119, 2012.

HOROWITZ, A. J. **A primer on sediment trace element chemistry**. 2.ed. Chelsea: Lewis, 1991. 136 p.

INDA, A. V. et al. Cinética da dissolução redutiva da goethita e hematita em solos poligenéticos. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 553-561, 2005.

INDA, A. V. et al. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organominerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, set/out, 2007.

INDA, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 851-866, 2005.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis** - Advanced course. Madison: Prentice-Hall, 1979. 895 p.

KAISER, D. R. et al. Nitrate and ammonium in soil solution in tobacco management systems. **Brazilian Journal of Soil Science**, v. 34, n. 2, p. 379-388, 2010.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. **Rev. Bras. De Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 209-213, 1998.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**, v. 29, p. 27-39, 1983.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. The 5 M NaOH concentration treatment for iron oxides in solis. **Clays Clay Miner.**, v. 30, p. 40-408, 1982.

KIM, W.; DOH, S. J.; YU, Y. & LEE, Y.I. Magnetic evaluation of sediment provenance in the northern East China Sea using fuzzy c-means cluster analysis. **Mar. Geol.**, 2013. (article in press). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2013.01.001>. Acesso em 15 mar. 2013.

KITAGAWA, Y.; MOLLER, M. R. F. Clay mineralogy of some typical soils in the Brazilian Amazon region. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 14, p. 201-228, 1979.

KLAGES, M. G. et al. Susspended solids carried by the Gallatin River of southwestern Montana: II. Using mineralogy for inferring sources. **Journal of Environmental Quality**, v. 4, p. 68–73, 1973.

LEVIN, I. P. 1999. **Relating statistics and experimental desing**. Thousand Oaks. Sage. 90 p.

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

MARINS, A. P. **Simulação Hidrológica do reservatório do Vacacaí-Mirim Santa Maria/RS utilizando o sistema IPHS1**. 2004. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MARTÍNEZ-CARRERAS, N. et al. Assessment of different colour parameters for discriminating potential suspended sediment sources and provenance: A multi-scale study in Luxembourg. **Geomorphology**, v. 118, p. 118-129, 2010a.

MARTÍNEZ-CARRERAS, N. et al The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Attert River catchment (Luxembourg). **Journal of Hydrology**, v. 382, p. 49–63, 2010b.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Proc. Clays. **Clay Mineral**, v. 7, p. 317- 327, 1960.

MELO, V. F. et al. Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 19-32, 2001.

MENEZES, F. P. **Substâncias húmicas em solos de diferentes feições geomorfológicas no Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Impact on sediment yield due to the intensification of tobacco production in a catchment in Southern Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 669-672, 2006.

MIGUEL, P. **Caracterização pedológica, uso da terra e modelagem da perda de solo em áreas de encosta do Rebordo do Planalto do RS**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MIGUEL, P. et al. Solo e dinâmica de ocupação das terras em áreas do rebordo do planalto do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. de Agrociência**, Pelotas, v. 17, n. 4-4, p. 447-455, out/dez. 2011.

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

MINELLA, J. P. G. et al. Changing sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. **Catena**, Amsterdam, v. 79, p. 228-236, 2009b.

MINELLA, J. P. G. et al. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 348, p. 546-563, 2008.

MINELLA, J. P. G. et al. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1637-1646, dez. 2007.

MINELLA, J. P. G. et al. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In: RACHEL B. P. et al. **Manejo e Conservação do Solo e da Água no Contexto das Mudanças Ambientais**. 2010. p. 105-122.

MINELLA, J. P. G. **Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural**. 2003. 80 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Rev. Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 3, mar. 2011.

MOURA-BUENO, J. M. **Erosão do solo no Rebordo do Planalto do Estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: [s.n.], 2012.

NASCIMENTO, M. D.; SOUZA, B. S. P. Mapeamento geomorfológico da área abrangida pela carta topográfica de Santa Maria - RS como subsídio ao planejamento ambiental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2, p. 83 - 90, 2010.

NELSON, E.J.; BOOTH, D.B. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 264, p. 51-68, 2002.

NORRISH, K.; TAYLOR, M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. **J. Soil Sci.**, v. 12, p. 294-306, 1961.

OLSON, K. R. et al. Erosion patterns on cultivated and forested hillslopes in Moscow Region, Russia. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 193–201, 2002.

OLSON, K. R. et al. Use of magnetic tracer and radio-caesium methods to determine past cropland soil erosion amounts and rates. **Catena**, Amsterdam, v. 104, p. 103-110, 2013.

PAIVA, E. M. C. D. et al. Evolução de processo erosivo acelerado em trecho do arroio Vacacaí-Mirim. **Rev. Bras. de Recursos Hídricos**, v. 6, p. 129-135, 2001.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 628 p.

PEDRON, F. A. **Classificação do potencial de uso das terras no perímetro urbano de Santa Maria – RS**. 2005, 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

PEDRON, F. A. **Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e Neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul**. 2007. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PEDRON, F. de A. et al. Morfologia e classificação taxonômica de Neossolos e saprolitos derivados de rochas vulcânicas da formação Serra Geral no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.119-128, 2009.

PEDRON, F. de A.; AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D. Alteração mineralógica de Neossolos em uma climo-litossequência no Planalto do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, 42:451-458, 2012.

PELLEGRINI, J. B. R. et al. Impacts of anthropic pressures on soil phosphorus availability, concentration, and phosphorus forms in sediments in a Southern Brazilian watershed. **Journal of Soils and Sediments**, v. 10. p. 451–460, 2010.

PETAN, S. et al. Modelação da erosão do solo da bacia do Rio Leça com a equação RUSLE e SIG. **Rev. de Recursos Hídricos**, v. 31, n. 1, p. 99-110, 2010.

POELKING, E. L. **Aptidão, evolução e conflitos de uso das terras no município de Itaara, RS**. 2007. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Impacto das atividades agropecuárias na qualidade da água. **Ciência & Ambiente**, v. 27, p. 85-96, 2003.

RODRIGUES, M. F. **Monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas florestais no Sul do Brasil**. 2011. 208 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

RUHOFF, A.L. et al. Mapeamentos de uso da terra e ocupação do espaço geográfico em Santa Maria, RS. **RA'E GA**, Curitiba, n. 7, p. 87-94, 2003.

RUSSELL, M. A. et al. Suspend sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. **Journal of Hydrology**, v. 252, p. 1-24, 2001.

SAMUEL-ROSA, A. **Funções de predição espacial de propriedades do solo**. 2012. 195 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SAMUEL-ROSA, A. et al. Uso da terra no Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 161-173, 2011.

SANTOS, A. et al. Hidroquímica da Amazônia Central III. Química da água de lavagem da floresta no ecossistema Campina Amazônica (Stemflow). **Acta Amazonica**, v. 11, n. 2, p. 335-346, 1981.

SANTOS, I. **Modelagem geo-bio-hidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR**. 2001. 92 f. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SARTORI, P. L. P. Geologia e geomorfologia de Santa Maria. **Ciência e Ambiente**, v. 38, p. 19-42, 2009.

SCHULZE, D. G. The influence of aluminium on iron oxides. VIII – Unit-cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. **Clays Clay Miner.**, v. 32, p. 36:44, 1984.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch photochemische extraktion mit saurer ammoniumoxalate. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung-Düngund Bodenkunde**, v. 105, n. 5, p. 94-202, 1964.

SCHWERTMANN, U. et al. The influence of aluminium on iron oxides. Preparation and properties of Al-substituted hematites. **Clays Clay Miner.**, v. 29, p. 269-276, 1979.

SEMA/UFSM. **Relatório final do inventário florestal contínuo do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2001. 706 p.

SEQUINATTO, L. **A insustentabilidade do uso do solo com fomicultura em terras declivosas**. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SINGH, B.; GILKES, R. J. Concentration of iron oxides from soil clays by 5 M NaOH treatment: The complete removal of sodalite and kaolin. **Clay Miner.**, v. 26, p. 463-472, 1991.

SMALL, I. F. et al. Quantitative sediment fingerprinting using a Bayesian uncertainty estimation framework. In: DYER, F. J. et al. **The structure, function, and management implications of fluvial sedimentary**. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, 2002. p. 443-450.

SOUZA, E. R.; FERNANDES, M. R. Sub-bacias hidrográficas: unidades básicas para o planejamento e gestão sustentáveis das atividades rurais. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte, v. 21, n. 207, p. 15-20, 2000.

STROGANOVA, M. N.; AGARKOVA, M. G. Urban soils: experimental study and classification (exemplified by the soils of southwestern Moscow). **Eurasian Soil Science**, v. 25, n. 3, p. 59-69, 1993.

STÜRMER, S. L. K. et al. Relação da granulometria do solo e morfologia do saprolito com a infiltração de água em Neossolos Regolíticos do Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 2057-2064, 2009.

TEN CATEN, A. et al. Desintensificação do uso da terra e sua relação com a erosão do solo. **Rev. Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 1006-1014, 2012.

TORRENT, J.; CABEDO, A. Sources of iron oxides in reddish brown soil profiles from calcarenites in Southern Spain. **Geoderma**, v. 37, p. 57-66, 1986.

VENTURA, E. et al. Developing a magnetic tracer to study soil erosion. **Catena**, v. 43, p. 277-291, 2001.

VENTURA, E. et al. The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer. **Catena**, v. 48, p. 149-161, 2002.

WALL, G. J.; WILDING, L. P. Mineralogy and related parameters of fluvial suspended sediments in northwestern Ohio. **Journal of Environmental Quality**, v. 5, p. 168–173, 1976.

WALLING D. E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. **Science of the Total Environment**, v. 344, p. 159-184, 2005.

WALLING, D. E. et al. Using Cs-137 measurements to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small Devon catchments. **Soil Till. Res.**, v. 69, p. 27-43, 2003.

WALLING, D. E., COLLINS, A. L. Suspended sediment sources in British rivers. In: WALLING, D. E., HOROWITZ, A. J. **Sediment Budgets**. Wallingford: IAHS Press, 2005. p. 123-133.

WALLING, D. E.; COLLINS, A. L. **Integrated assessment of catchment sediment budgets: a technical manual**. Exeter: University of Exeter, 2000. 168 p.

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**, East Melbourne, v. 46, p. 327-336, 1995.

WASSON, R. J. et al. Erosion of river terraces as a component of large catchment sediment budgets: a pilot study from the gangetic plain, **Journal of Asian Earth Sciences**. (article in press). Disponível em : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.02.003>. Acesso em 15 mar. 2013.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science Plant Analysis**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

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

ZALAMENA, J. **Impacto do uso da terra nos atributos químicos e físicos de solos do Rebordo do Planalto - RS**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ZAPATA, F. The use of environmental radionuclide as tracers in soil erosion and sedimentation investigation: recent advances and future developments. **Soil and Tillage Research**, v. 69, p. 3-13, 2003.

ANEXOS

Anexo 1

Granulometria e imagens dos perfis da área de captação da Barragem da CORSAN, Santa Maria, RS.

Perfil 01



Perfil 02



Perfil 03



Perfil 04



Perfil 05



Perfil 06



Perfil 07



Perfil 08



Perfil 09



Perfil 10



Análise granulométrica Perfil 01

Horizonte	Prof. (cm)	Composição granulométrica da terra fina g Kg ⁻¹ (dispersão com NaOH)			
		Areia grossa (2 – 0,2mm)	Areia fina (0,2 – 0,05mm)	Silte (0,05 – 0,002mm)	Argila (<0,002mm)
A1	0 – 48	32	483	95	82
A2	48 – 90	26	532	80	77
A3	90 – 103	30	541	77	53
A4	103 – 128	29	497	86	94
B	128 – 158	45	386	75	201
C1	158 – 178	45	478	55	74
C2	178+	50	461	53	99

Análise granulométrica Perfil 02

Horizonte	Prof. (cm)	Composição granulométrica da terra fina g Kg ⁻¹ (dispersão com NaOH)			
		Areia grossa (2 – 0,2mm)	Areia fina (0,2 – 0,05mm)	Silte (0,05 – 0,002mm)	Argila (<0,002mm)
A	0 – 28	17	134	431	303
C/R	28 – 45	8	80	414	369
R	45+	-	-	-	-

Análise granulométrica Perfil 03

Horizonte	Prof. (cm)	Composição granulométrica da terra fina g Kg ⁻¹ (dispersão com NaOH)			
		Areia grossa (2 – 0,2mm)	Areia fina (0,2 – 0,05mm)	Silte (0,05 – 0,002mm)	Argila (<0,002mm)
Ap	0 – 17	24	66	417	384
A	17 – 48	24	53	397	423
AB	48 – 64	14	37	292	581
BA	64 – 82	10	32	253	641
B	82 – 113	12	27	238	648
BC	113 – 148	6	36	318	534
C	148+	-	-	-	-

Análise granulométrica Perfil 04

Horizonte	Prof. (cm)	Composição granulométrica da terra fina g Kg ⁻¹ (dispersão com NaOH)			
		Areia grossa (2 – 0,2mm)	Areia fina (0,2 – 0,05mm)	Silte (0,05 – 0,002mm)	Argila (<0,002mm)
A1	0 – 20	16	491	73	84
A2	20 – 49	15	521	67	54
B	49 – 82	16	490	79	89
C	82+	-	-	-	-

Análise granulométrica Perfil 05

Horizonte	Prof. (cm)	Composição granulométrica da terra fina g Kg ⁻¹ (dispersão com NaOH)			
		Areia grossa (2 – 0,2mm)	Areia fina (0,2 – 0,05mm)	Silte (0,05 – 0,002mm)	Argila (<0,002mm)
A	0 – 20	18	425	80	73
R	20+	-	-	-	-

Análise granulométrica Perfil 06

Horizonte	Prof. (cm)	Composição granulométrica da terra fina g Kg ⁻¹ (dispersão com NaOH)			
		Areia grossa (2 – 0,2mm)	Areia fina (0,2 – 0,05mm)	Silte (0,05 – 0,002mm)	Argila (<0,002mm)
A	0 – 21	5	23	547	393
E	21 – 46	12	55	659	197
B	46 – 67	5	21	289	653
BC	67 – 83	7	31	498	418
BCf	83 – 93	10	41	506	382
C	93+	-	-	-	-

Análise granulométrica Perfil 07

Horizonte	Prof. (cm)	Composição Granulométrica (g.Kg ⁻¹)			Argila natural (g.Kg ⁻¹)	Silte/Argila	GF (%)
		Areia	Silte	Argila			
Ap	0 – 12	763	130	107	27	1,21	75
A	12 – 29	727	135	140	34	0,96	76
Cr ₁	29 – 60	706	134	161	35	0,83	78

Análise granulométrica Perfil 08

Horizonte	Prof. (cm)	Composição Granulométrica (g.Kg ⁻¹)			Argila Natural (g.Kg ⁻¹)	Silte/Argila	GF (%)
		Areia	Silte	Argila			
A	0 – 30	669	204	127	46	1,60	64
Cr ₁	30 – 60	430	271	298	57	0,91	81
Cr ₂	60 – 82	414	355	230	49	1,55	79

Análise granulométrica Perfil 09

Horizonte	Prof. (cm)	Composição Granulométrica (g.Kg ⁻¹)			Argila Natural (g.Kg ⁻¹)	Silte/Argila	GF (%)
		Areia	Silte	Argila			
A	0 – 30	635	257	107	31	2,40	71
Cr	30 – 69	676	179	145	35	1,23	76

Análise granulométrica Perfil 10

Horizonte	Prof. (cm)	Composição Granulométrica (g.Kg ⁻¹)			Argila Natural (g.Kg ⁻¹)	Silte/Argila	GF (%)
		Areia	Silte	Argila			
A	0 – 23	534	210	256	56	0,82	78

Anexo 2

Estradas principais e estradas secundárias da área de estudo.



Anexo 3

Foto representativa do coletor de sedimentos em suspensão (arquivo pessoal).

