

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

Marcos Antônio Bender

**DINÂMICA DE PERDA DE FÓSFORO DURANTE EVENTOS DE  
CHUVA-VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DE ARVOREZINHA**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2016**

**Marcos Antônio Bender**

**DINÂMICA DE PERDA DE FÓSFORO DURANTE EVENTOS DE CHUVA-VAZÃO  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DE ARVOREZINHA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Área Processos Químicos e Ciclagem de Elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências do Solo**.

Orientador: Prof. Danilo Rheinheimer dos Santos

Santa Maria, RS, Brasil  
2016

**Marcos Antônio Bender**

**DINÂMICA DE PERDA DE FÓSFORO DURANTE EVENTOS DE CHUVA-VAZÃO  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DE ARVOREZINHA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Área Processos Químicos e Ciclagem de Elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências do Solo**.

Aprovado em 30 de agosto de 2016

---

**Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos**

Universidade Federal de Santa Maria, (Presidente orientador)

---

**Dr. Jean Paolo Gomes Minella**

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

---

**Dr. Tales Tiecher**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Santa Maria, RS

2016.

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

Bender, Marcos Antônio

DINÂMICA DE PERDA DE FÓSFORO DURANTE EVENTOS DE CHUVA-  
VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DE ARVOREZINHA / Marcos Antônio Bender.- 2016.  
57 p.; 30 cm

Orientador: Danilo Rheinheimer dos Santos  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2016

1. Transferência de Fósforo na bacia hidrográfica de Arvorezinha 2. Especificação  
química das formas solúveis de fósforo 3. Histerese de fósforo total e  
dissolvido durante evento de chuva-vazão I. Rheinheimer dos Santos, Danilo II.  
Título.

*Dedico a meus pais Elisa e Nestor por todo amor e carinho,*

*...e à minha companheira Melissa Rocha Ragagnin, por tudo!*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria pelos 7 anos de ensino público, gratuito e de extrema qualidade.

Ao governo Lula e Dilma que elevaram o ensino superior a um patamar nunca antes visto na história do nosso país, aumentando a possibilidade de acesso e permanência de jovens e adultos antes excluídos desse processo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela formação científica durante meu curso de mestrado.

Às instituições de fomento à pesquisa, CNPq e CAPES, pelo auxílio financeiro e a concessão das bolsas de estudos aos alunos de graduação e pós-graduação.

Aos meus pais Nestor Antônio Bender e Elisa Gertrudes Bender que sempre me apoiaram e incentivaram, muitas vezes abrindo mão de várias coisas para possibilitar minha formação.

A meus irmãos por todo carinho e incentivo recebido em todos os momentos da minha vida.

À minha namorada Melissa Rocha Ragagnin, por todo amor, carinho, amizade, incentivo e compreensão, em todos os momentos deste trabalho.

A minha família de sangue (Bender e Rockenbach) e de coração (Rocha e Ragagnin) por todo incentivo e apoio recebido.

Ao mestre e amigo Danilo Rheinheimer dos Santos pela orientação desde a iniciação científica em 2009, pela formação política, pelos conselhos e pelo exemplo de dedicação à pesquisa.

Aos professores Tales Tiecher e Jean Paolo Gomes Minella pelo incentivo e amparo intelectual na aplicação e desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Química e Fertilidade do Solo pela ajuda na análise das amostras, em especial ao doutorando Gilmar Schaefer e a mestrandia Mayara Regina Fornari.

Ao Rafael Ramon e Cláudia Alessandra Peixoto de Barros e todos os alunos do grupo do Laboratório de Hidrossedimentologia pela ajuda indispensável na coleta das amostras, e pelo processamento e análise da perda de sedimento.

Aos patrocinadores pelo suporte financeiro durante todos os anos de monitoramento da bacia hidrográfica de Arvorezina, cito aqui: FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, SINDITABACO - Sindicato das Indústrias do Tabaco, Governo do estado do Rio Grande do Sul através do programa RS Rural, FINEP - Financiadora de estudos e Projetos.

Ao secretário Everton por toda destreza e disposição na execução dos tramites do PPGCS.

Aos colegas de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela amizade e convívio, especialmente a Elci Gubiani, Fábio Joel Kochem Mallmann, José Augusto Monteiro de Castro Lima, Renan Gonzatto, Lessandro De Conti, Marília Camotti Bastos, e Jocelina Rosa de Vargas.

Enfim, a todos que estiveram presentes direta ou indiretamente nesta etapa da minha vida e que contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Não herdamos a Terra de nossos avós, apenas a tomamos emprestada de nossos netos”  
(Antigo provérbio indígena)*



## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria

### **DINÂMICA DE PERDA DE P DURANTE EVENTOS DE CHUVA-VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DE ARVOREZINHA**

AUTOR: MARCOS ANTÔNIO BENDER

ORIENTADOR: DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 30 de agosto de 2016.

Nos últimos anos a intensificação das atividades agrícolas levou a um aumento generalizado do fósforo nas águas de superfície causando problemas ambientais, sociais e econômicos devido à eutroficação. O objetivo desse trabalho é descrever a dinâmica de perda de P durante eventos de chuva-vazão na bacia hidrográfica de Arvorezinha. O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do arroio Lajeado Ferreira, município de Arvorezinha, RS (28 52'S e 52 05'O), com 1,19 km<sup>2</sup> de área. Foram analisados 9 eventos (116 amostras) durante o período de julho de 2011 a julho de 2015. O pH e a condutividade elétrica foram mediadas imediatamente após a chegada das amostras no laboratório. Uma alíquota de amostra de água+sedimento foi filtrada a 0,22 µm. No filtrado foi determinado dos cátions por espectrometria de emissão atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), e a concentração de P por cromatografia iônica de alta performance (HPLC). O teor total de P das amostras de água+sedimento foi determinada em ICP-OES após digestão ácida (HCl + HNO<sub>3</sub>) assistida por forno de microondas. No exutório da bacia, a vazão foi monitorada pela leitura dos níveis d'água em um linígrafo instalado numa calha Parshall e a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) foi estimada pela correlação entre CSS medido e a turbidez. A precipitação foi monitorada com pluviômetros e pluviógrafos instalados na bacia. Para a estimativa da especiação química dos íons em solução utilizou-se o programa Visual Minteq (for Windows) versão 3.1. Para interpretação da histerese do P dissolvido foi utilizado um modelo de 3 componentes. Devido à alta afinidade dos solos por P a maior parte do nutriente foi perdida na forma particulada (88%), contudo em ambiente reduzido parte desse P pode ser desorvido e tornar-se biodisponível. Como as maiores perdas de P ocorrem durante os eventos, as amostragens sazonais subestimam o real estado trófico das águas sendo necessário sua inclusão para conhecer a dinâmica de transferência. A maior parte do P dissolvido está na forma livre variando entre 89 e 99% do total da massa de P dissolvido. O pH foi a principal característica que alterou a distribuição das espécies dissolvidas de P. O escoamento da água superficial e subsuperficial foram responsáveis pela maior parte do transporte de P dissolvido. Foi encontrada uma boa correlação entre os teores de CSS e P total e particulado. Os teores de P total superaram o limite permitido pela resolução do CONAMA em quase todos os eventos. Para os eventos coletados houve predomínio de picos de sedimento e P total antecedendo o pico de vazão. O índice de histerese caiu no final do inverno e início da primavera, como o solo foi mobilizado aumentou a quantidade de sedimento e P disponível aumentando o aporte destes para a calha fluvial.

**Palavras-chave:** histerese, perda de fósforo, evento de chuva

## **ABSTRACT**

Master's Dissertation  
Post-Graduation Program on Soil Sciences  
Universidad Federal de Santa Maria

### **LOSS DYNAMICS OF P DURING RAIN FLOW EVENTS IN THE HYDROGRAPHIC BASIN OF ARVOREZINHA**

AUTHOR: MARCOS ANTÔNIO BENDER  
ADVISOR AT UFSM: DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS  
Date and Place of Defence: Santa Maria, august 30, 2016.

In recent years, the intensification of agricultural activities has led to a widespread increase in phosphorus in surface waters causing environmental, social and economic problems due to eutrophication. The objective of this paper is to describe the loss dynamics of P during events of rain flow in the hydrographic basin of Arvorezinha. The study was carried out in the hydrographic basin of the Lajeado Ferreira stream, municipality of Arvorezinha, RS (28 52'S e 52 05'O), with 1,19 km<sup>2</sup> of area. Nine events were analyzed (116 samples) during the period of July 2011 to July 2015. The pH and electrical conductivity were measured immediately after the arrival of the samples in the laboratory. An aliquot of water+sediment sample was filtered at 0,22 µm. In the filtrate, the cations were determined by atomic emission spectrometry by Inductively Coupled Plasma (ICP-OES), and the concentration by high performance ion (liquid) chromatography (HPLC). The total content of P of the water+sediment samples were determined in ICP-OES after acid digestion (HCl + HNO<sub>3</sub>) assisted by microwave oven. In the mouth of the basin, the flow was monitored by reading the water levels on a linigraph installed on a Parshall flume and the sediment concentration in suspension (CSS) was estimated by the correlation between measured CSS and turbidity. The precipitation was monitored with rain gauges and pluviographs installed in the basin. In order to estimate the chemical speciation of the ions in solution the program Visual Minteq (for Windows) version 3.1 was used. For the interpretation of the dissolved P hysteresis, a 3-component model was used. Due to the high affinity of the soils for P most of the nutrient was lost in the particulate form (88%), however, in a reduced environment part of this P can be desorbed and become bioavailable. Since the largest losses of P occur during the events, the seasonal samplings underestimate the real trophic state of the waters being necessary its inclusion to know the dynamics of transference. The majority of the dissolved P is in the free form ranging from 89 to 99% of the total mass of dissolved P. The pH was the main characteristic that altered the distribution of the dissolved species of P. The runoff of surface and subsurface water was responsible for most of the transport of dissolved P. A good correlation between the contents of CSS and total and particulate P was found. The total P content exceeded the limit allowed by CONAMA's resolution in almost all events. For the collected events, there was a predominance of sediment peaks and total P preceding the peak flow. The hysteresis index fell in the end of the winter and in early spring, since the soil was mobilized increased the amount of sediment and P available increasing their contribution to the fluvial channel.

**Keywords:** hysteresis, loss of phosphorus, rain event.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Uso do solo da bacia de Arvorezinha.....	23
Figura 2 – Hietograma, hidrograma, concentração de sedimentos em suspensão e fósforo total e histerese do fósforo total, fósforo dissolvido e da concentração de sedimento em suspensão.....	32
Figura 3 – Concentração de fósforo total e dissolvido nas amostras coletadas durante o fluxo de base entre coletados quinzenalmente de setembro de 2011 a setembro de 2012.....	37
Figura 4 – Relação entre fósforo total e fósforo particulado em função da concentração de sedimentos em suspensão. ....	39
Figura 5 – Variação entre fósforo dissolvido e fósforo particulado durante o evento do dia 21/07/2011 .....	40
Figura 6 – Características químicas dos eventos coletados entre junho de 2011 e março de 2013, na bacia de Arvorezinha, RS, Brasil. ....	41
Figura 7 – Comportamento das espécies de fósforo dissolvido, expressos em percentagem da massa total, e hidrograma de quatro eventos. ....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos trabalhos que foram realizados na bacia hidrográfica de Arvorezinha, RS, Brasil.....	15
Tabela 2 – Características diagnósticas utilizadas para determinar o ranking das componentes. ....	27
Tabela 3 – Caracterização hidrossedimentológicas e da perda de fósforo dos eventos estudados.....	30
Tabela 3: Equação de regressão entre concentração de sedimentos em suspensão, fósforo particulado e fósforo dissolvido versus vazão.....	38
Tabela 4 – Resultado da análise de histerese entre descarga líquida e fósforo dissolvido. ....	45
Tabela 4 – Resultado das variáveis hidrológicas e da histerese de fósforo total e concentração de sedimento em suspensão, para os eventos monitorados na bacia hidrográfica de Arvorezinha.....	48

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 O monitoramento das bacias hidrográficas .....	14
1.2 O fósforo como poluidor ambiental .....	15
<b>2 HIPÓTESE .....</b>	<b>20</b>
<b>3 OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
3.1 Objetivo geral .....	21
3.2 Objetivos específico .....	21
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
4.1 Área de estudo .....	22
4.2. Monitoramento hidrossedimentológico .....	23
4.2.1 Monitoramento da precipitação.....	24
4.2.2 Monitoramento da vazão .....	24
4.2.3 Monitoramento da concentração de sedimento em suspensão.....	24
4.3 Determinação dos elementos químicos na forma dissolvido e determinação do fósforo total .....	25
4.4 Especiação química das formas solúveis de fósforo .....	25
4.5 Caracterização do transporte de fósforo dissolvido por meio de da histerese de três componentes .....	26
4.6 Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão, concentração de sedimentos em suspensão e fósforo total .....	27
4.6.1 Análise qualitativa da histerese entre concentração de sedimentos em suspensão e vazão.....	27
4.6.2 Análise quantitativa da histerese .....	29
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
5.1 Caracterização hidrossedimentológica e perda de fósforo dos eventos.....	30
5.2 Formas de fósforo perdido durante os eventos.....	38
5.2.1 Relação entre concentração e fósforo versus vazão .....	38
5.2.2 Relação entre transporte de concentração de sedimentos em suspensão e formas de fósforo.....	38
5.2.3 Especiação química do fósforo dissolvido .....	40
5.3 HISTERESE DAS FORMAS DE P .....	44
5.3.1 Histerese entre vazão e concentração de fósforo dissolvido .....	44
5.3.2 Histerese entre vazão e concentração de fósforo total e concentração de sedimentos em suspensão .....	46
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>51</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 O monitoramento das bacias hidrográficas

O estado Rio Grande do Sul é caracterizado pela presença de mais de 300 mil famílias de agricultores familiares que possuem área média de 16,3 ha (IBGE, Censo Agropecuário 2006). O processo histórico de ocupação e colonização do norte do estado baseado na comercialização de pequenas áreas de terra foi o fator determinante para a formação da atual estrutura fundiária desta região, ocorrendo o predomínio de pequenas unidades de produção familiares. Para o estabelecimento dos sistemas de produção nessas áreas, houve a conversão de florestas naturais em lavouras, aumentando a vulnerabilidade para ocorrência de processos erosivos (PELLEGRINI et al., 2015a). Como o solo deve ser capaz de prover a reprodução socioeconômica da família, com a fragmentação das Unidades de Produção Familiar (UPFs) ocorre a necessidade de intensificação do uso de solos com alta fragilidade, em relevos por vezes de elevada declividade. O tamanho reduzido das áreas, o solo inapto para as culturas anuais, localização da sede próxima a cursos d'água e nascentes, a necessidade de vasta área de estradas para o acesso a sede e as lavouras, tornam a adequação ambiental de difícil execução e aceitação pelos agricultores. Nessa região é comum encontrar situações que representam conflitos entre as atividades agropecuárias, a legislação ambiental e o potencial de uso dos solos (PELLEGRINI, et al., 2015b) ocorrendo graves problemas de erosão.

Em bacias hidrográficas rurais com altos coeficientes de escoamento e alta produção de sedimentos o processo de erosão precisa ser controlado para evitar além da perda de solo a transferência de poluentes e consequente degradação irreversível do solo e da água. Nesse contexto o grupo de estudo em bacias hidrográficas da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) vem monitorando intensamente bacias hidrográficas com diferentes níveis de impactos da agricultura no Rio Grande do Sul, entre essas está a bacia hidrográfica de Arvorezinha utilizada no presente estudo. A bacia de Arvorezinha situa-se na cabeceira do rio Taquari, importante afluente do rio Jacuí que abastece a região metropolitana do estado.

Na Tabela 1, são apresentados os diversos trabalhos que já foram realizados na bacia. O tema predominante nas dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos acadêmicos, estão relacionados com a modelagem de água e sedimento (MERTEN; MINELLA, 2006; MINELLA et al., 2008; DALBIANCO, 2009, 2013; UZEIKA, 2009; MINELLA; MERTEN; RUHOFF, 2010; OLIVEIRA, 2010; MINELLA; MERTEN; MAGNAGO, 2011; MORO,

2011; BARROS, 2012, 2016; MINELLA; MERTEN, 2012; UZEIKA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; BARROS et al., 2014a; BARROS et al., 2014b) e ao estudo da contribuição das diferentes fontes na produção de sedimento (MINELLA, 2003, 2007; MINELLA et al., 2007, 2009; MINELLA; WALLING; MERTEN, 2008, 2014; MINELLA; MERTEN; CLARKE, 2009; MAIER, 2013; TIECHER et al., 2015; TIECHER, 2015; TIECHER et al., 2016). Os demais foram tentativas de entender a dinâmica de carbono, nitrogênio e mineralogia do sedimento (LOPES, 2006; KOCHER, 2014), o trabalho de Kocher (2014) foi o único a trabalhar com o fósforo na bacia, contudo limitando-se ao estudo da transferência de P no sedimento durante os eventos.

Tabela 1 – Resumo dos trabalhos que foram realizados na bacia hidrográfica de Arvorezinha, RS, Brasil.

Publicação da Bacia de Arvorezinha monitorada desde 2002		
Dissertação de Mestrado	Tese de Doutorado	Artigos de pesquisa
Minella (2003)	Minella (2007)	Merten; Minella (2006)
Lopes (2006)	Oliveira (2010)	Minella et al. (2007)
Dalbiano (2009)	Moro (2011)	Minella; Walling; Merten (2008)
Uzeika (2009)	Maier (2013)	Minella et al. (2008)
Barros (2012)	Dalbiano (2013)	Minella et al. (2009)
Kocher (2014)	Tiecher (2015)	Minella; Merten; Clarke (2009)
Ramon (2017)*	Barros (2016)	Minella; Merten; Ruhoff (2010)
		Minella; Merten; Magnago (2011)
		Minella; Merten (2012)
		Uzeika et al. (2012)
		Oliveira et al. (2012)
		Barros et al. (2014a)
		Barros et al. (2014b)
		Minella; Walling; Merten (2014)
		Tiecher et al. (2015)
		Tiecher et al. (2016)

\*Trabalho em andamento com perspectiva de término

## 1.2 O fósforo como poluidor ambiental

Em solos pouco intemperizados a disponibilidade de P para as plantas é controlada pela dissolução do fosfato presente no mineral primário (TIESSEN et al., 1984). Já em solos mais

intemperizados a decomposição e mineralização da serapilheira e matéria orgânica do solo se torna a principal fonte de P devido à alta retenção pelos colóides (VINCENT; TURNER; TANNER, 2010). Para que haja rendimento satisfatório na introdução de culturas comerciais em sistemas naturais é necessário um aporte de fosfato via fertilização devido à alta exigência nutricional dessas culturas e a deficiente disponibilidade de P (TIECHER et al., 2012).

As aplicações sucessivas e constantes de fertilizantes fosfatados, acima das taxas de exportação pelas culturas e erosão do solo causam acúmulo de P no solo, sobretudo nas camadas mais superficiais, (GUARDINI et al., 2012; RHEINHEIMER et al., 2003), principalmente em culturas que possuem alto valor agregado como o tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). No sistema integrado da indústria do tabaco a assistência técnica da indústria não utiliza qualquer critério agrônomo, ambiental para recomendar a dose de fertilizantes utilizadas sendo quase sempre as mesmas para todo o sul do Brasil, independente de fatores como quantidade de argila e ou histórico de adubação as doses recomendadas são geralmente superestimadas acabam promovendo a saturação de P nos sítios de troca, aumentando as taxas de dessorção e aumentando o potencial poluidor (PELLEGRINI et al., 2010).

Nos solos os óxidos de ferro são os colóides inorgânicos mais eficazes na adsorção do P devido à forte atração dos prótons pelo grupo funcional, o que facilita o processo de troca de ligantes (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989). O fosfato pode ligar-se sob diferentes energias de ligação em formas monodentadas, em que um oxigênio do fosfato é ligado ao metal; bidentadas, em que dois oxigênios são ligados ao metal; e binucleadas, em que dois oxigênios do fosfato são ligados a dois átomos do metal. A energia de ligação é crescente para os compostos monodentados, bidentados e binucleados e a possibilidade de dessorção do fosfato aumenta na ordem inversa (PARFITT, 1989). A energia de adsorção do fósforo vai decaindo à medida que os sítios mais ávidos por P vão sendo saturados, e o P é redistribuído em frações retidas com menor energia e de maior disponibilidade às plantas, mas também mais sujeitos a serem perdidos e transportados para os mananciais hídricos (RHEINHEIMER et al., 2000; GUARDINI et al., 2012).

Nos últimos anos a intensificação das atividades agrícolas levou a um aumento generalizado do fósforo nas águas de superfície (CAPOANE et al., 2015; SHARPLEY et al., 2015; LI et al., 2015, WITHERS; JARVIE, 2008; MAINSTONE;PARR, 2002) causando problemas de eutroficação, uma vez que, o fósforo e o nitrogênio são nutrientes chaves para esse processo(CORRELL, 1998).A eutroficação pode ser definida como os efeitos do crescimento de algas e deterioração da qualidade de água devido ao enriquecimento da água com nutrientes proveniente de áreas agrícolas e urbanas (YANG et al., 2008). Durante o



processo de eutroficação ocorre aumento da produção primária, com conseqüente decomposição da massa de algas mortas por organismos anaeróbicos, causando o consumo do oxigênio da água e favorecendo o aumento de organismos anaeróbicos. Com a degradação incompleta do material orgânico, ocorre a geração de metabólitos intermediários como metano, etileno, ácido butírico e outras substâncias de baixa massa molecular, as quais são tóxicas aos organismos aeróbicos, ocorrendo à floração de cianobactérias e algas azuis (DANIEL; SHARPLEY; LEMUNYON, 1998). Ao longo dos anos vários trabalhos vêm relatando a floração de cionobactérias ao longo do estuário da lagoa dos Patos no estado do Rio Grande do Sul (MATTHIENSEN; YUNES; CODD, 1999; ROSA et al., 2005; YUNES, 2009). O P dissolvido e particulado oriundo das áreas agrícolas na cabeceira do Jacuí pode estar sendo mobilizados para mananciais a jusante em especial no Estuário do Guaíba, Lagoa dos Patos e contribuindo para a ocorrência desse problema.

O monitoramento da concentração de fósforo na água, e no sedimento é necessário para conhecer o estado trófico dos mananciais. Devido ao caráter esporádico e muitas vezes de baixa duração dos eventos os picos de poluição podem escapar dos sistemas de monitoramento baseados em amostragem sazonais e assim subestimar o estado eutrófico do manancial (JONES et al., 2012). É importante, desta forma, estabelecer programas de monitoramento contínuo para compreender o regime hidrológico dos rios e a dinâmica dos sedimentos e dos nutrientes nas bacias hidrográficas. A inclusão de amostragens durante os eventos é necessária, pois é durante eles que ocorrem as maiores perdas de sedimentos e P total (HOROWITZ, 2004; RAMOS et al., 2015; LLOYD et al., 2016). Segundo Ramos et al. (2015) os eventos de chuva foram responsáveis pelo transporte de 60 a 86% do total de sedimento e pelo transporte de 87 a 92% do total de P, no rio Enxoeiro, durante três anos de monitoramento.

Devido à forte afinidade dos solos por P a maior parte do fósforo é perdida na forma particulada a partir da interação com o ferro e alumínio (HOROWITZ, 2004; RODRÍGUEZ-BLANCO; TABOADA-CASTRO; TABOADA-CASTRO, 2010). Segundo trabalho de Bortoluzzi et al. (2013), o diâmetro das partículas dos sedimentos erodidos possuem tamanho menor que os solos de origem, demonstrando assim, a seletividade do transporte de sedimentos. A dessorção do P depende principalmente do tamanho da partícula e mineralogia do sedimento. Assim ocorre maior dessorção de P na ascensão e recessão do nível do rio onde predomina partículas mais finas em comparação ao pico da vazão onde aumentou a proporção de partículas do tamanho areia. Os maiores valores de P dissolvido foram encontrados nos sedimentos em suspensão coletados durante a última fase do evento tempestade, que foi dominado por material de tamanho argila, devido a presença de maior número de sítios de adsorção. O P transportado

na forma particulada não disponível durante um primeiro momento pode sofrer dessorção na presença de condições redox. A concentração do fósforo particulado potencialmente biodisponível pode aumentar em até 4 vezes em ambiente reduzido em relação ao ambiente oxidado (SCHENATO, 2009).

A separação do P dissolvido do total, e ainda a separação das espécies de P dissolvido fornece uma melhor compreensão de sua biodisponibilidade. O fósforo dissolvido em ambientes naturais pode estar complexado a íons metálicos formando precipitados e presente na forma orgânica. Contudo a maior parte se encontra na forma de fosfato livre sendo mais biodisponíveis para as algas (BERRETTA; SANSALONE, 2011).

A maior parte da variação química da água ocorre em resposta ao aumento da vazão, contudo dificilmente encontramos uma variação linear entre vazão e concentração de solutos. A compreensão da dinâmica de transporte de sedimentos e nutrientes durante eventos pode ser melhorada através do estudo da evolução das relações entre os parâmetros de descarga e de qualidade da água durante um evento de chuva individual. Essa relação geralmente apresenta uma forma cíclica conhecida como histerese (LLOYD et al., 2016). A histerese pode ser definida como o aparecimento de um atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro (MINELLA et al., 2011; LEFRANCOIS et al., 2007). Como não existe um padrão de comportamento único para histerese, desta forma ao plotar os dados dos solutos com a Q, podemos conhecer um padrão ou comportamento da hidrologia da bacia.

O estudo de Williams (1989) foi um dos primeiros a descreverem as formas mais comuns de laços de histerese e a fornecer possíveis explicações para a formação dos diferentes laços da relação de sedimentos em concentração e vazão nos eventos de chuva. Diversos trabalhos apontam a ocorrência da histerese entre vazão e vários parâmetros da qualidade da água como concentração de sedimentos em suspensão (ZABALETA et al., 2007; WILLIAMS, 1989; IDE et al., 2009; SEEGER et al., 2004; NADAL-ROMERO; REGÜÉS; LATRON, 2008; MINELLA et al., 2011; LEFRANCOIS et al., 2007) e fósforo (LLOYD et al., 2016; HOUSE; WARWICK, 1998; DONN et al., 2012; RAMOS et al., 2015; BOWES et al., 2015; BOWES et al., 2005; IDE et al., 2008; BIEROZA; HEATHWAITE, 2015; MCDIFFETT et al., 1989).

Para qualificar a histerese de elementos solúveis muitos estudos utilizam modelos com apenas duas componentes levando em consideração água do evento e pré-evento, onde água do evento equivale a precipitação ou interceptação da água e água pré-evento corresponde água armazenada subterraneamente, de composição química e isotópica uniforme. Contudo, em sistemas onde água da zona do solo representa uma significativa e distinta contribuição ao

escoamento superficial, é necessário considerar este como um terceiro componente (EVANS; DAVIES, 1998).

A extensão e o grau de intensidade da histerese dependem de muitos e complexos fatores que envolvem tanto processos químicos quanto hidrológicos (HOUSE; WARWICK, 1998). Bowes et al. (2005) encontrou que a histerese de P total, particulado e dissolvido nas terras altas da bacia do rio River Swale em Yorkshire, Reino Unido, tendiam a ser no sentido anti-horário e predominante no sentido horário nas planícies, e ele associou a mudança no sentido devido a maior intensificação do uso agrícola e erosão de sedimentos mais finos na área de planície aumentando a velocidade de transporte de P. Em estudo no Rio Enborne, Bowes et al. (2015) encontrou predomínio de histerese no sentido horário indicando rápida mobilização e transporte de P para o local monitorado durante os eventos, o rápido transporte de P foi associado ao P armazenado ao longo das margem (em fossas sépticas, fezes de animais) e drenos no campo que poderia fornecer uma rota rápida transferência de insumos ricos em P para o rio. Esse comportamento ainda poderia estar associado ao arraste de P armazenado no sedimento dentro do rio. No rio Enxoé em Portugal foram observadas trajetórias no sentido horário e anti-horário. Trajetórias horárias foram observadas sempre que sedimentos foram transportados a partir predominantemente de depósitos do rio e das margens devido ao pisoteio do gado. Já trajetórias horárias foram observadas quando as terras a montante voltavam a ser cultivadas (RAMOS et al., 2015).

Os levantamentos de pesquisa são fundamentais para conhecermos a dinâmica de transferência de sedimento e nutrientes em nível de bacia hidrográfica, essas informações são importantes para traçarmos estratégias para à melhoria e manutenção da qualidade dos recursos naturais. Nesse sentido, o presente trabalho se propõe a estudar a dinâmica de transferência das diferentes frações de P na bacia hidrográfica de Arvorezinha.

## 2 HIPÓTESE

A bacia de Arvorezinha situa-se na cabeceira do rio Taquari, importante afluente do rio Jacuí que abastece a região metropolitana do estado. A cultura agrícola predominante na bacia é o tabaco, onde são aplicadas doses sucessivas e constantes de fertilizantes fosfatados solúveis. Como são solos tropicais e intemperizados, possuem grande afinidade por P, assim a maior parte do fósforo é perdida na forma particulada, principalmente durante os eventos, pois nesse momento ocorrem as maiores perdas de sedimento. Desta forma é necessária a inclusão de amostragens durante os eventos para não subestimar a quantidade de P transferido para a água e, conseqüentemente, conhecer o real estado trófico do manancial.

Para analisar a transferência de P dissolvido na bacia, foi considerado um modelo conceitual que divide os escoamentos em três componentes: superficial, subsuperficial rápido e subterrâneo. Os dois primeiros são responsáveis pela maior transferência de P dissolvido nos eventos, já que a afinidade dos solos por P não permite que haja a lixiviação do nutriente para o lençol freático, isso torna a contribuição do escoamento subterrâneo pouco representativo para os processos de perda de P dissolvido. O P dissolvido é perdido predominantemente na forma livre, sendo desprezíveis as concentrações das formas precipitadas, evidenciando o potencial de contaminação do P dissolvido.

O padrão de transferência de fósforo particulado e sedimento, na bacia experimental de Arvorezinha, é reflexo das características fisiográficas da bacia, a pequena área de drenagem, as características das vertentes e ainda a proximidade das fontes de sedimento com a rede de drenagem. Ocorre assim um rápido transporte de P particulado e sedimento durante os eventos, que independem da cobertura do solo e da intensidade da precipitação. Contudo as maiores perdas de P particulado ocorrem durante o período em que o solo se encontra mobilizado, e também quando ocorrem as precipitações de maior intensidade.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Compreender o fluxo de perda de P para a água em uma bacia hidrográfica rural durante eventos de chuva-vazão de variável intensidade e ocorridos em diferentes épocas do ano.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- i)* Avaliar as formas predominantes de P dissolvido perdidas durante os eventos;
- ii)* Avaliar se os intervalos de amostragem foram adequados para avaliar o comportamento da histerese;
- iii)* Avaliar o padrão de transferência de P particulado na bacia de Arvorezinha.

## 4 MATERIALE METÓDOS

O desenvolvimento deste trabalho visa complementar os trabalhos que vem sendo realizados na bacia experimental de Arvorezinha, monitorada desde 2002. Os dados de precipitação, vazão e concentração de sedimento em suspensão, dos nove eventos coletados, foram monitorados e determinados pelo grupo de pesquisa em conservação do solo e hidrossedimentologia do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria e cedidos para auxiliar na discussão da presente dissertação de mestrado.

### 4.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do Arroio Lajeado Ferreira está localizada no município de Arvorezinha, situada na região centro-norte do estado do Rio Grande do Sul (28°52'S e 52°05'O), região Sul do Brasil. A bacia hidrográfica do Arroio Lajeado Ferreira possui área de drenagem de 1.19 km<sup>2</sup>, está localizada na cabeceira do rio Taquari, que é um afluente do rio Jacuí importante rio no Rio Grande do Sul, pois abastece a região metropolitana de Porte Alegre onde vivem mais de 2 milhões de pessoas. O clima da região é temperado super úmido, classificado como Cfb segundo classificação de Köppen, com verões fracos e invernos com geadas severas e frequentes, sem estação seca. A precipitação é bem distribuída ao longo do ano e varia de 1250 a 2000 mm.

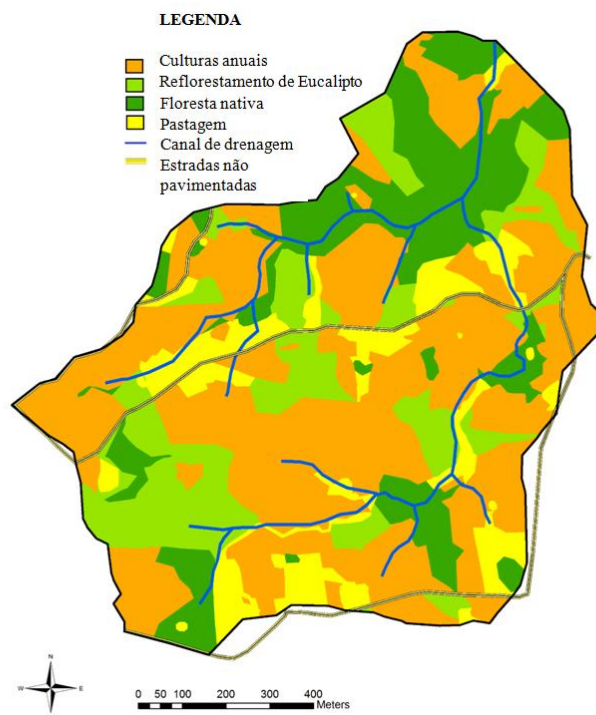
O índice de erosividade ( $EI_{30}$ ) para a bacia é de 6.540 MJ mm ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, considerada moderada a forte. Os meses que apresentam maior  $EI_{30}$  são setembro e outubro (ARGENTA et al., 2001) período de preparação do solo e plantio do principal cultivo da bacia o Tabaco, o que aumenta o risco de perdas de sedimentos e fertilizantes. A altitude varia de 560 a 740 metros, onde a porção superior da bacia possui relevo suave, e a porção inferior é montanhosa (DALBIANCO, 2013). De acordo com Rosgen (1994), o canal é enquadrado como A3, considerado íngreme (declividade entre 4 e 10%) com cascatas, e ao longo do seu trecho é possui material pedregoso (fundo e margens) (MINELLA, 2003).

A geologia da bacia hidrográfica é caracterizada por derramamentos vulcânicos da formação Serra Geral (basalto). As classes de solos predominantes são Argissolos, Cambissolos e Neossolos, que ocorrem de forma associada, com porcentagens que variam conforme a posição no relevo. O terço superior da bacia é caracterizado por um relevo ondulado e presença de Argissolos com presença de B textural, associados com solos menos desenvolvidos

(Cambissolos e Neossolos). No terço médio, o relevo é um pouco mais acentuado que no terço superior ocorrendo uma variabilidade de solos e ocorrem associações entre Argissolos, Cambissolos e Neossolos. No terço inferior, o relevo montanhoso, é formado por solos menos desenvolvidos, compostos de associações entre Cambissolos e Neossolos. Os Argissolos são os solos mais comuns de serem encontrados na bacia estando presente em 57% da área, seguido pelos Cambissolos (33%) e pelos Neossolos (10%). Em geral os solos são caracterizados pela presença de horizonte A com textura grosseira, e com a presença de cascalhos na camada superficial e impedimentos ao fluxo de água em camadas subsuperficiais devido à presença de horizonte B textural, saprólito ou rocha (DALBIANCO, 2013).

O uso e manejo do solo são caracterizados pela cultura do tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) no sistema cultivo mínimo (23%), cultura do tabaco no sistema convencional (17%), mata nativa (20%), reflorestamento com eucalipto (*Eucalyptus* spp.)(23%), pastagens (7%), sede (3%), açudes (1%) e capoeiras (6%) (BARROS et al., 2014).

Figura 1: Uso do solo da bacia de Arvorezinha



Fonte: Tiecheret al. (2014).

#### 4.2. Monitoramento hidrossedimentológico

Entre julho de 2011 e 2015 foram coletadas amostras de água + sedimentos durante 9 eventos chuva-vazão (116 amostras). As amostragens foram realizadas durante no início, na ascensão, no pico e na recessão do hidrograma procurando representar todas as fases do evento. Foram coletados cinco eventos em julho, período de mobilização do solo para plantio do tabaco; três eventos na fase de desenvolvimento da cultura (setembro, outubro) e um evento em março (após colheita do tabaco). Os eventos coletados apresentaram uma variabilidade na erodibilidade dos eventos devido a diferentes graus de cobertura de solo e intensidade das precipitações entre os eventos. Além das coletas de eventos, foram coletadas 27 amostras em dias normais, para caracterizar a concentração de P no fluxo de base, amostragem desses foi distribuída entre o período de 30 de agosto de 2011 e 07 de setembro de 2012

#### 4.2.1 Monitoramento da precipitação

Os dados da precipitação foram obtidos através de 5 pluviômetros e de dois pluviômetros, instalados próximos aos divisores de água e na parte central da bacia.

#### 4.2.2 Monitoramento da vazão

A descarga líquida é determinada através do monitoramento dos níveis d'água com um linígrafo instalado numa calha Parshall. A conversão do nível ou lâmina de água para vazão -  $Q$  ( $L s^{-1}$ ), de acordo com as dimensões da calha, segue a equação 1:

$$Q = 4,519 \times H^{1,595} \times 1000 \quad (1)$$

Onde H é em metros.

O linígrafo tem acoplado um datalogger para armazenar as informações.

#### 4.2.3 Monitoramento da concentração de sedimento em suspensão

Para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) foi realizada a coleta de CSS com o amostrador (USDH48) durante os eventos e criado uma curva que correlaciona os dados de CSS medidos com a turbidez, sendo está medida por turbidímetros periodicamente calibrados com soluções padrões mais detalhes da metodologia podem ser obtidos em Barros (2016).



### **4.3 Determinação dos elementos químicos na forma dissolvido e determinação do fósforo total**

As campanhas para a coleta de eventos de chuva tiveram como objetivo a coleta de amostras para determinação da concentração de sedimentos em suspensão e caracterização química da água. Foi utilizado o amostrador USDH-48 para a retirada das amostras durante a elevação do nível do canal e durante o período de recessão do mesmo objetivando discretizar a onda de cheia. O amostrador também foi utilizado para amostragem entre eventos durante o fluxo de base. Após a coleta as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Química e Fertilidade do Solo, da UFSM.

Imediatamente após a chegada das amostras no laboratório o pH da água foi determinado por potenciometria e a condutividade elétrica foi determinada por condutivímetro de bancada. Posteriormente, uma alíquota de amostra de água+sedimento foi filtrada a 0,22  $\mu\text{m}$ , considerando que os elementos que passassem por esse tamanho de poro encontram-se na forma dissolvido.

Na amostra filtrada, o teor de carbono orgânico dissolvido (COD) foi estimado pela oxidação com  $\text{Cr}^{6+}$  em meio ácido por 4 horas a 60°C, e determinada por colorimetria em espectrofotômetro a 580 nm (DICK; GOMES; ROSINHA, 1998). A concentração de carbono foi calculada com base em uma curva padrão contendo glicose.

Numa segunda alíquota do filtrado, foi determinado os teores solúveis de Al, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sr, Ti, V e Zn por espectrometria de emissão atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES, Perkin-Elmer) e a concentração dos ânions solúveis, sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e fluoreto ( $\text{F}^-$ ) por cromatografia iônica de alta performance (HPLC).

Para estimar o teor total de P foi adicionado, em tubos de teflon, 20ml de amostras (água + sedimento) + 0,5 ml de HCl + 1 ml de  $\text{HNO}_3$ . Posteriormente, foi realizada uma digestão em forno de micro-ondas, por 9,5 minutos, em temperatura de 182°C, para, então, ser feita a leitura do teor de P total no ICP-OES. A fase particulada foi obtida pela subtração do teor de P dissolvido (água filtrada a 0,22 $\mu\text{m}$ ) do teor de P total (teor de P na água + sedimento).

### **4.4 Especificação química das formas solúveis de fósforo**

A especificação iônica da solução foi realizada em quatro eventos, nos dias 20.7.2011, 01.10.2011, 06.07.2012 e 12.03.2013 usando o programa computacional Visual Minteq (versão

3.1 - GUSTAFSSON, 2014), a partir das concentrações dos teores solúveis dos cátions ( $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{B}^{+3}$ ,  $\text{Ba}^{+2}$ ,  $\text{Be}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{La}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Sb}^{+3}$ ,  $\text{Se}^{+4}$ ,  $\text{Si}^{+4}$ ,  $\text{Sr}^{+2}$ ,  $\text{Ti}^{+4}$ ,  $\text{V}^{+4}$  e  $\text{Zn}^{+2}$ ), dos ânions ( $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{-}$  e  $\text{Cl}^{-}$ ); dos teores COD e do pH. As espécies ligadas aos ânions orgânicos foram estimadas com base no teor de COD, usando o modelo de “Gaussian DOM” (GRIMM et al., 1991). Foram estimadas a concentração, e a distribuição percentual das espécies fósforo dissolvidos na solução.

#### **4.5 Caracterização do transporte de fósforo dissolvido por meio de da histerese de três componentes**

No conjunto de nove eventos, foi realizada a análise de histerese entre Q e soluto, utilizando-se o fósforo na forma dissolvida (P dissolvido). O objetivo da análise é a compreensão da variação espacial, temporal do soluto e da dinâmica do transporte na transferência de P até a água, esse conhecimento pode ser empregado no direcionamento das medidas de redução de perdas de P de forma eficiente.

Sabendo-se que cada combinação de concentração das três componentes produz um laço de histerese diferente e reconhecível, quando essas formas são observadas em dados reais de concentração do soluto/Q, certas afirmações podem ser feitas em relação às concentrações desconhecidas das componentes para isso é necessário utilizar modelos de escoamento conhecidos de outros estudos como o proposto por Evans e Davies (1998), onde durante a descarga o pico da contribuição da água superficial do evento antecede o pico de contribuição da água subsuperficial, e antes do evento e após a recessão do hidrograma predomina a água do escoamento subterrâneo.

Conforme Evans e Davies (1998) existem três critérios para a classificação do laço de histerese:

1. Padrão da rotação (sentido horário/anti-horário). Nesse caso o padrão de histerese se caracterizará no sentido horário ou no sentido anti-horário. Em um laço no sentido horário, a concentração total do soluto é maior durante a fase de ascensão do hidrograma do que durante a recessão. Nesse caso a concentração do soluto no escoamento superficial do evento ( $C_{ES}$ ) é maior que a concentração do soluto no escoamento subsuperficial ( $C_{ESS}$ ). Já em um laço no sentido anti-horário,  $C_{ESS}$  deve ser maior que a  $C_{ES}$ .
2. Curvatura (convexo/côncavo): um laço “convexo” implica que em uma parte do laço, a concentração total ( $C_T$ ) deve tornar-se um valor maior que a concentração

da água subterrânea ( $C_{EST}$ ), e na outra o valor deve ser menor que  $C_{EST}$ . Assim,  $C_{EST}$  deve ser intermediária, comparativamente a concentração dos outros dois componentes. Um laço “côncavo” é quando toda ou uma parte significativa do laço é côncava. Isso implica que  $C_{EST}$  deve ser ou a maior ou a menor concentração dentre os componentes.

3. Inclinação (positiva/negativa): a inclinação deve ser considerada somente onde o laço é côncavo. Uma inclinação positiva implica que a  $C_T$  é maior durante o evento do que durante o fluxo de base, e por isso a  $C_{EST}$  tem a menor concentração dos três componentes. Uma inclinação negativa implica o oposto, ou seja, a  $C_{EST}$  tem a maior concentração.

Tabela 2 – Características diagnósticas utilizadas para determinar o ranking das componentes.

Tipo	Padrão da rotação	Curvatura	Inclinação	Ranking dos componentes
C1	Horário	Convexa	Não existe	$C_{ES} > C_{EST} > C_{ESS}$
C2	Horário	Côncava	Positiva	$C_{ES} > C_{SS} > C_{EST}$
C3	Horário	Côncava	Negativa	$C_{EST} > C_{ES} > C_{ESS}$
A1	Anti-horário	Convexa	Não existe	$C_{ESS} > C_{EST} > C_{ES}$
A2	Anti-horário	Côncava	Positiva	$C_{ESS} > C_{ES} > C_{EST}$
A3	Anti-horário	Côncava	Negativa	$C_{EST} > C_{ESS} > C_{ES}$

Fonte: adaptado de Evans e Davies (1998).

#### 4.6 Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão, concentração de sedimento em suspensão e fósforo total

##### 4.6.1 Análise qualitativa da histerese entre concentração de sedimento em suspensão e vazão

O comportamento hidrossedimentológico da bacia pode ser analisado a partir do sentido e do formato do laço de histerese, essas curvas de histerese relacionam a concentração ou descarga de sedimentos com a vazão. De maneira geral, a dinâmica da Q e da CSS durante os eventos não apresenta um sincronismo de fase (LEFRANCOIS et al., 2007). A relação entre essas duas variáveis nos permite inferir no entendimento da transferência de sedimentos e água durante os eventos. Williams (1989) identificou e classificou cinco tipos comuns da curva de histerese que podem ser distinguidos em valor simples (single-valued), sentido horário (clockwise), sentido anti-horário (counter clockwise), linha simples comum (single lineplus) e

figura oito (figure eight). Entre esses padrões os mais comumente encontrados na literatura são histerese no sentido horário, seguido por histerese no sentido anti-horário e Figura de 8 (MINELLA et al., 2011; NADAL-ROMERO et al., 2008).

**Sentido horário:** Histerese com curva com sentido horário ocorre quando a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) do ramo crescente é maior do que do ramo decrescente para uma mesma vazão. Esse tipo de curva ocorre quando os sedimentos são mobilizados, transportados e depositados rapidamente. Para isso ocorrer à fonte de sedimento deve estar próxima ao canal, acredita-se que a fonte principal de sedimentos é representada pelos sedimentos que se encontram depositados na calha fluvial e é exaurida com a evolução do evento (LEFRANCOIS et al., 2007). O que também pode contribuir para esse tipo de comportamento é a rápida redução de CSS durante o ramo decrescente devido ao reduzido estoque de sedimento na calha associado a um aumento da vazão, por conta do aumento da participação do escoamento subsuperficial, diluindo a CSS (MINELLA, 2011).

**Sentido anti-horário:** Quando a CSS é menor no ramo decrescente do que no ramo crescente para uma mesma vazão a histerese formada é do tipo anti-horário, ocorre um pico de CSS depois do pico da vazão (SEEGER et al., 2004). Uma das explicações para esse tipo de comportamento é a chegada de sedimentos de fontes mais distantes, como aqueles sedimentos que são mobilizados na bacia vertente e transferidos pelo escoamento superficial para o canal fluvial (MINELLA et al., 2011).

**Figura oito:** Quando a curva da histerese apresentar tanto laço no sentido horário quanto anti-horário tem-se histerese do tipo oito. Esse tipo de comportamento ocorre quando a CSS e a vazão aumentam aproximadamente juntas, mas é a CSS que atinge o pico primeiro produzindo uma curva horária, após atingir o pico há um decrescimento lento da CSS, já a vazão decresce muito mais rapidamente (WILLIAMS, 1989), esse comportamento só é possível quando a disponibilidade e transporte de sedimento são elevados para que não ocorra seu rápido declínio (MINELLA et al., 2011).

**Linha de valor único:** A histerese do classe linha de valor único é o tipo mais simples de relação entre a CSS e a vazão, nesse caso a relação entre CSS e a Q

é a mesma entre o ramo ascendente e decrescente do hidrograma, ocorrendo uma sincronização entre CSS e vazão (WILLIANS, 1989).

#### 4.6.2 Análise quantitativa da histerese

A análise quantitativa da histerese nos permite a comparação entre os eventos, épocas do ano com diferentes manejos culturais e ainda a comparação entre bacias. O formato do laço da histerese pode ser quantificado a partir da metodologia apresentada por Lawler et al. (2006). O índice de histerese (IH) foi obtido a partir da análise dos dados de vazão (Q) e CSS e de Q e P total e da construção do gráfico entre essas variáveis em função da Q. Sabendo a vazão máxima ( $Q_{max}$ ) e vazão mínima ( $Q_{min}$ ) foi calculado o valor central entre a vazão máxima e mínima do ramo ascendente do evento ( $Q_{cen}$ ), segunda a equação 2.

$$Q_{cen} = 0,5 \times (Q_{max} - Q_{min}) + Q_{min} \quad (2)$$

Para o valor  $Q_{cen}$  obtido foram encontrados os valores de CSS e P total no ramo crescente (CSS RC e PT RC) e no ramo decrescente a CSS RD e PT RD utilizando-se o gráfico da CSS vs. Q e P total VS. Q. Para isso foi feito a interpolação entre os pontos que possuem CSS P total e Q conhecidas (medidas).

Se a curva de histerese possuir sentido horário, o índice de histerese (IH) será positivo e calculado pela Equação 3 para CSS e pela Equação 4 para P total.

$$IH_{CSS} = (CSS_{RC}/CSS_{RD}) - 1 \quad (3)$$

$$IH_{PT} = (PT_{RC}/PT_{RD}) - 1 \quad (4)$$

e, se a curva de histerese possuir sentido anti-horário, o índice de histerese, será negativo e calculado pela Equação 5 e 6.

$$IH_{CSS} = (-1/(CSS_{RC}/CSS_{RD})) + 1 \quad (5)$$

$$IH_{PT} = (-1/(PT_{RC}/PT_{RD})) + 1 \quad (6)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização hidrossedimentológica e perda de fósforo dos eventos

O evento ocorrido no dia 20/07/2011 foi o de maior magnitude entre todos os monitorados, sendo responsável por elevadas vazões e pela alta produção de sedimentos e P. Estima-se perda de 24,76 Mg de sedimento e 39,32 kg de P total fósforo nas 39 horas de duração da chuva. A alta perda de sedimentos ocorreu devido à alta precipitação e de uma pequena parte do solo já ter sido revolvida, pois incidiu na época que as lavouras começam a ser preparadas para o plantio do tabaco. Na figura 2 pode-se observar o comportamento das variáveis durante o evento. A produção de sedimentos foi maior durante os primeiros pulsos da precipitação, sendo que a sua fonte é limitada e rapidamente esgotada; portanto a transferência dos sedimentos torna-se dependente das fontes de sedimento disponíveis próximas ao canal fluvial (BARROS, 2016). A produção de fósforo segue um comportamento semelhante ao do sedimento: ela aumenta expressivamente durante os primeiros pulsos de precipitação e diminui antes da vazão máxima. Assim a transferência de P é dependente de fontes disponíveis próximos ao canal fluvial.

O evento pluviométrico ocorrido no dia 01/10/11 foi de baixa magnitude e ocorreu no período em que as plantas de tabaco se encontravam em início de desenvolvimento. Apesar da elevada quantidade de solo exposto foi produzido apenas um total de 0,12 Mg de sedimento e 0,1 kg de P total. A precipitação ocorrida no dia 06 junho de 2012 se deu quando o solo possui ainda elevada cobertura, devido, sobretudo a presença de plantas espontâneas. As amostras começaram a ser coletadas quando o hidrograma ainda estava em recessão de uma primeira precipitação. No total foram produzidos 1,41Mg de sedimento e 1,6 kg de P total. Nesses dois últimos eventos parece não ocorrer a diminuição brusca na transferência do P e de sedimentos, pois a CSS e o teor de P total seguiu o comportamento do hidrograma (Figura 2). Isso deve ter ocorrido porque a baixa intensidade dos eventos não deve ter sido capaz de esgotar o P e o sedimento disponíveis.

Tabela 3 – Caracterização hidrossedimentológicas e da perda de fósforo dos eventos estudados.

Evento	PPT	Qmax	CSS max	PS	PEPd	PEPt	Ptmax	Ptmed	Pdmax	Pdmed
	mm	L s <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	Mg	----- kg-----		-----µg L <sup>-1</sup> -----			
20/07/2011	127,0	3399	609,5	24,7	3,78	39,3	819,2	412,3	53,6	34,6
01/10/2011	16,9	57	217,9	0,1	0,02	0,1	129,5	56,7	16,7	13,6
06/07/2012	57,4	536	446,4	1,4	0,26	1,5	410,7	207,4	57,7	37,2
12/03/2013	26,3	235	206,7	0,4	0,09	0,5	156,1	113,6	29,1	18,3
20/09/2013	84,0	576	2176,2	6,2	0,11	2,6	595,8	281,3	82,3	12,6
26/10/2013	35,8	463	1048	3,1	0,06	3,2	1465,5	530,6	108,6	33,9
23/07/2014	82,7	1034	1068,3	6,6	0,67	-	-	-	-	-
08/07/2015	52,1	536	248,8	2,5	0,21	3,2	272,1	107,3	34,7	9,2
12/07/2015	98,6	599	5425,1	7,7	1,59	8,7	972,2	191,3	62,1	22,4

Onde: PPT: precipitação acumulada no evento; Qmax: vazão máxima do evento; C<sub>ss</sub>max: concentração máxima de sedimentos em suspensão; PS: produção de sedimentos no evento; PPD: perda estimada de P disponível no evento; PEPt: perda estimada de P total no evento; Ptmax: Concentração máxima de P total; Ptmed: Concentração média de P total; Pdmax: Concentração máxima de P dissolvido; Pdmed: Concentração média de P dissolvido.

Obs.: PPT; Qmax; C<sub>ss</sub>max; PS retirada de Barros, 2016; evento do dia 23/07/2015 não foi realizado a determinação de P total.

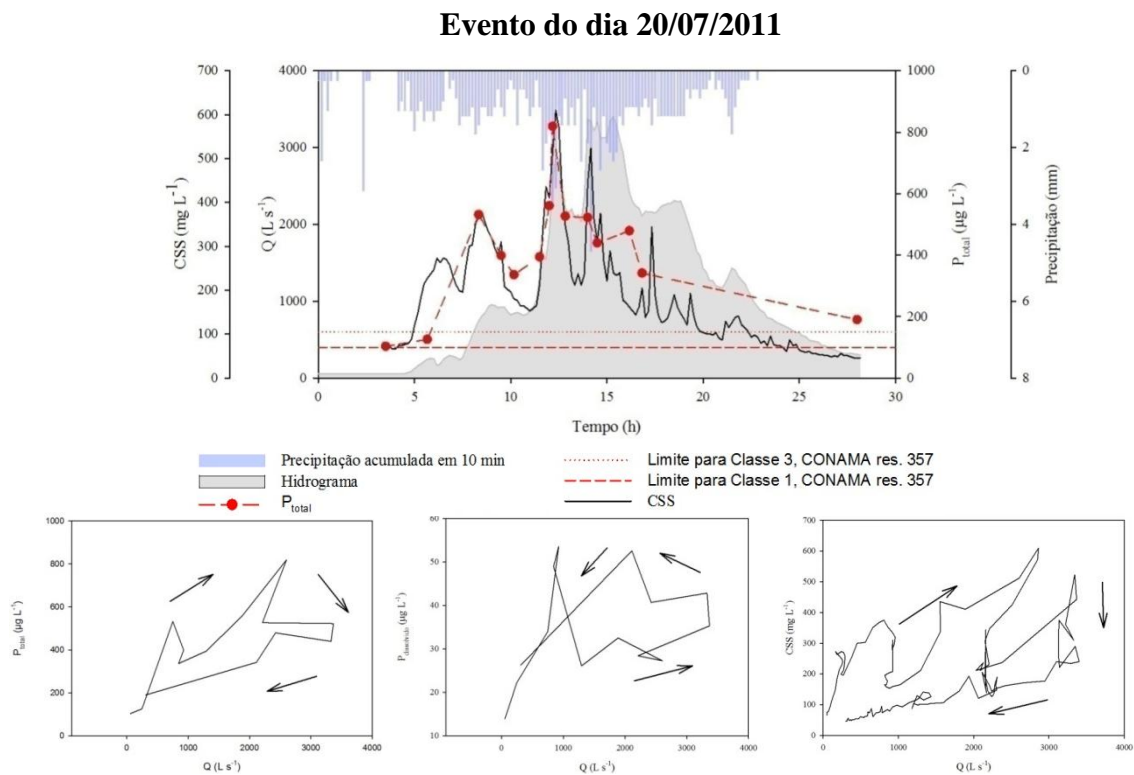
O evento pluvial ocorrido no dia 12/03/2013 coincidiu com o período após a colheita do tabaco, que mesmo sem suas folhas, havia alta cobertura do solo devido às espécies de gramíneas que se beneficiam da alta disponibilidade de nutrientes. Houve rápida mobilização de P e de sedimento; essas variáveis já se encontravam de queda no momento de máxima vazão. Indicando a presença de P e de sedimento próximo ao canal de drenagem. A quantidade total de P perdido no evento foi de 0,5 kg em toda bacia.

No dia 20/09/2013 ocorreu um evento de grande magnitude, ocasionando perda de 6,21 Mg de sedimento e 3,5 kg de P total. Os dois próximos eventos (20/09/2013 e 26/10/2013) ocorreram imediatamente após o transplante das mudas de tabaco e, portanto, com máxima exposição do solo aos processos erosivos. Assim, houve contínua perda de P e sedimento, pois essas variáveis seguem o comportamento do hidrograma (Figura 2).

É durante os eventos que ocorrem as maiores transferências de P. Nas amostras coletadas no período entre eventos, quando predomina o fluxo de base, são baixas as concentrações de P total (Figura 3). Desta forma é necessária a inclusão de amostragens durante os eventos para não subestimar a quantidade de P transferido para a água e assim conhecer o real estado trófico do manancial. Para conhecer a dinâmica do P durante os eventos é necessária a realização de pelo menos uma amostragem a cada hora. Na Figura 2 podemos perceber que a

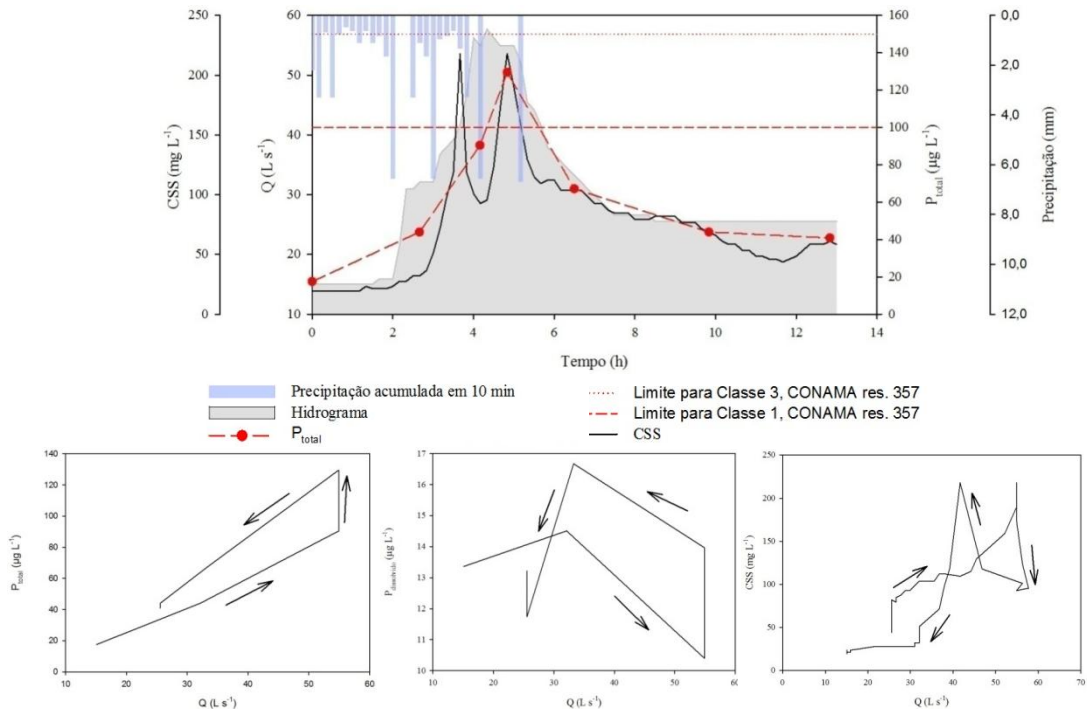
quantidade de amostras coletadas no evento do dia 20/09/2013 foram insuficientes para representar a transferência de P total durante o evento.

Figura 2 – Hietograma, hidrograma, concentração de sedimentos em suspensão e fósforo total e Histerese do fósforo total, fósforo dissolvido e da concentração de sedimento em suspensão

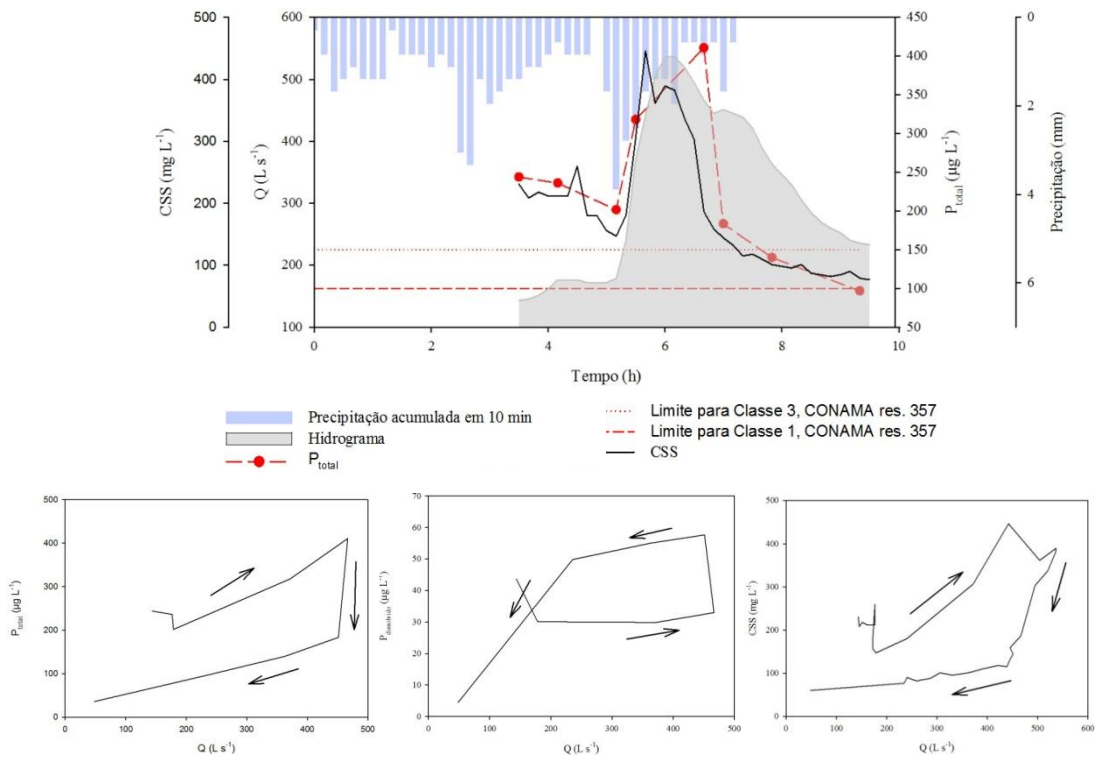




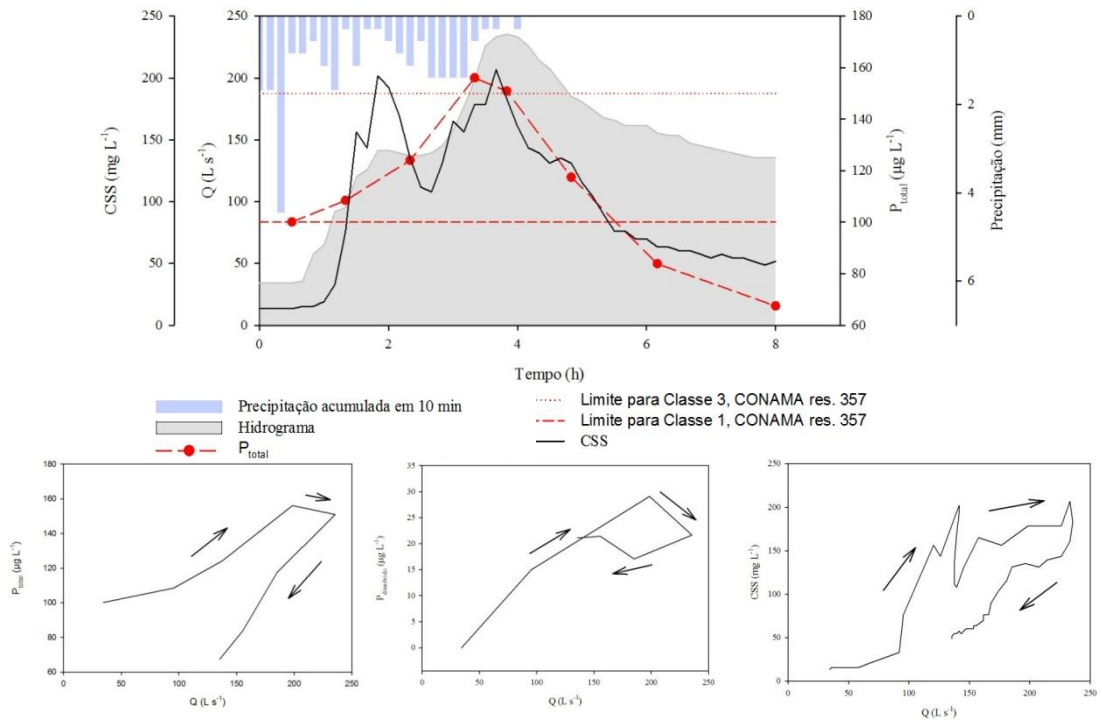
### Evento do dia 01/10/2011



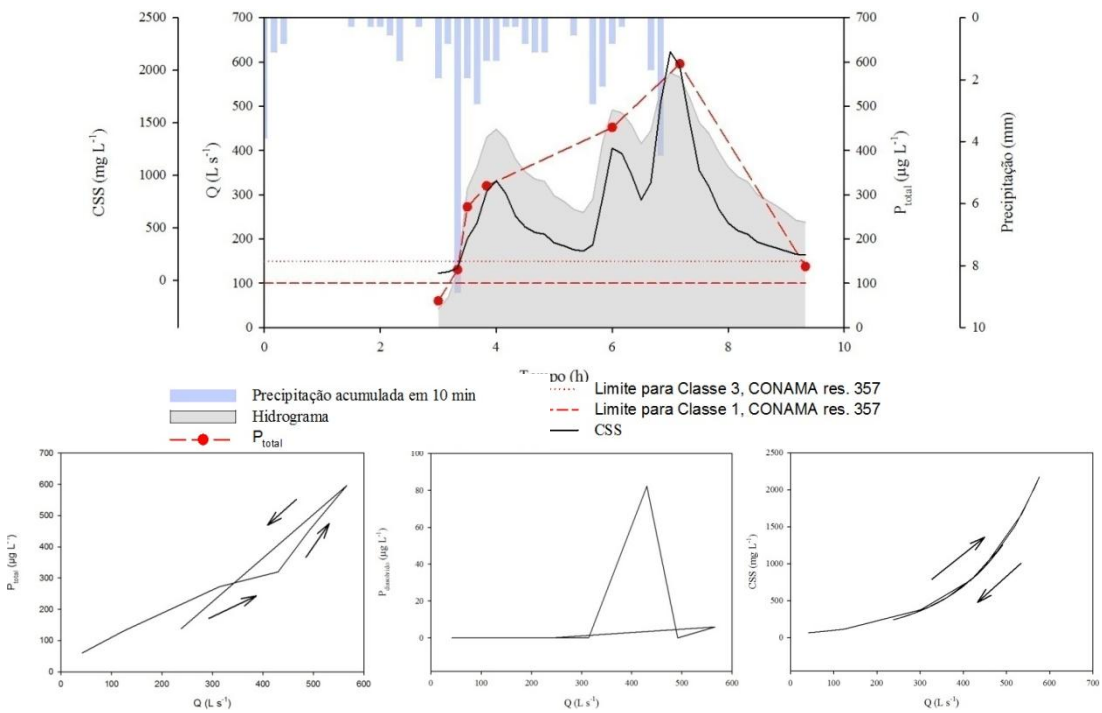
### Evento do dia 06/07/2012



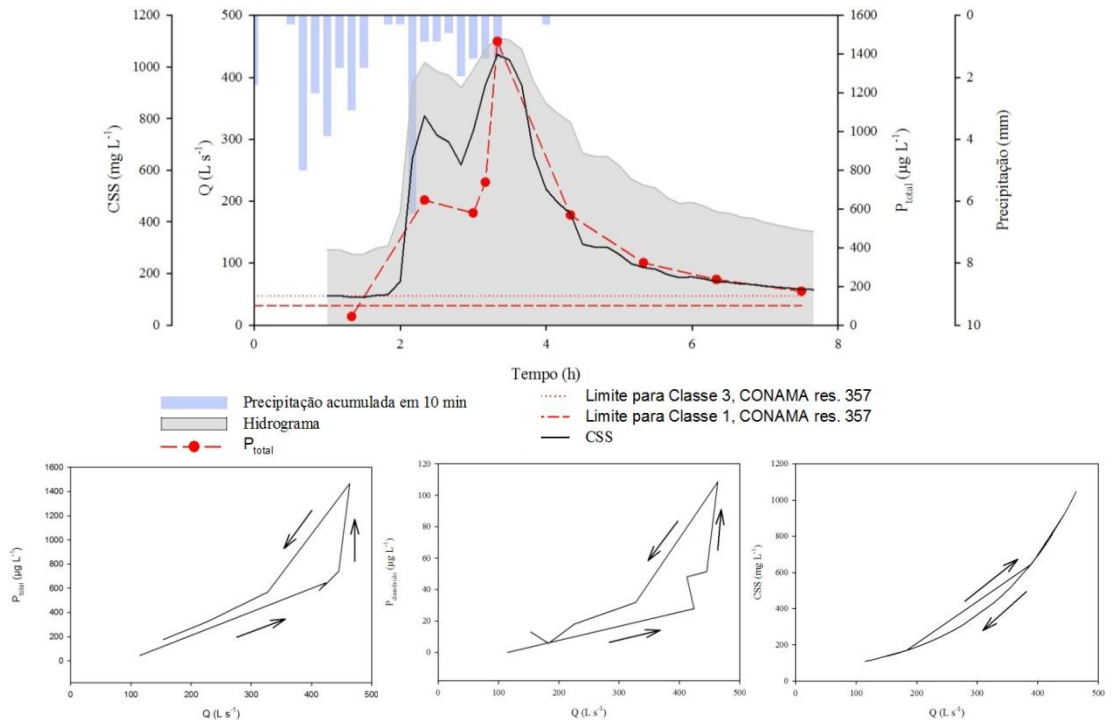
### Evento do dia 12/03/2013



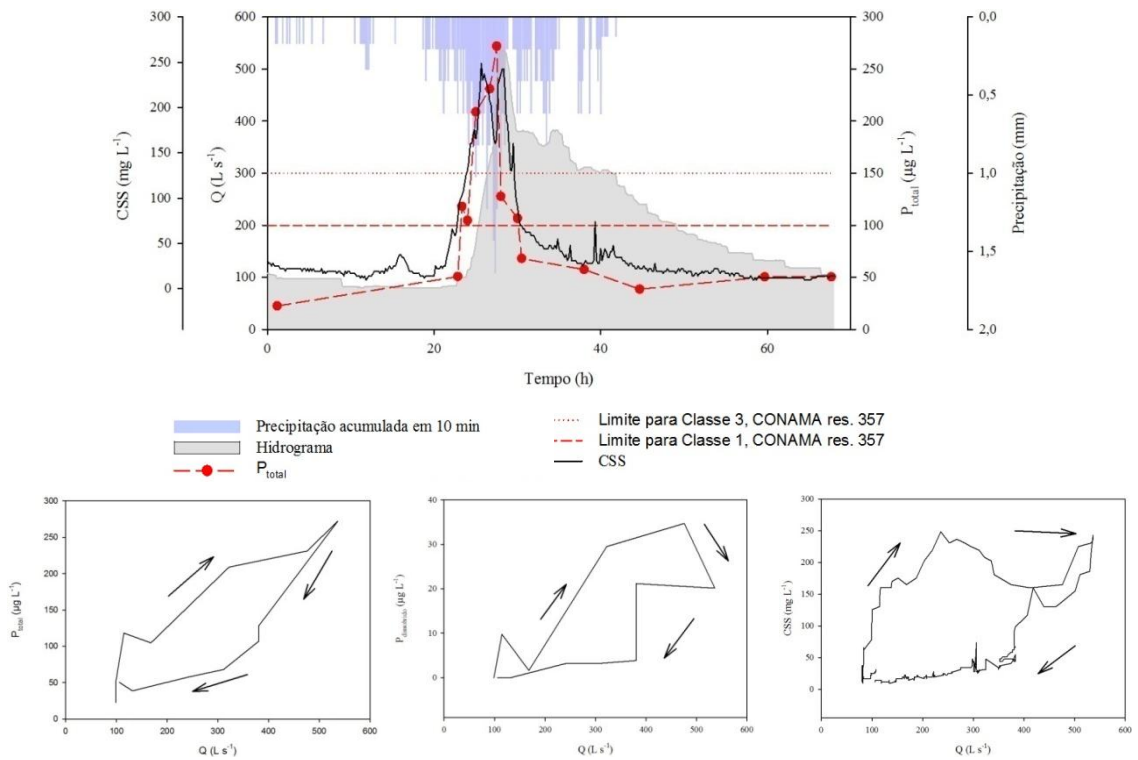
### Evento do dia 20/09/2013



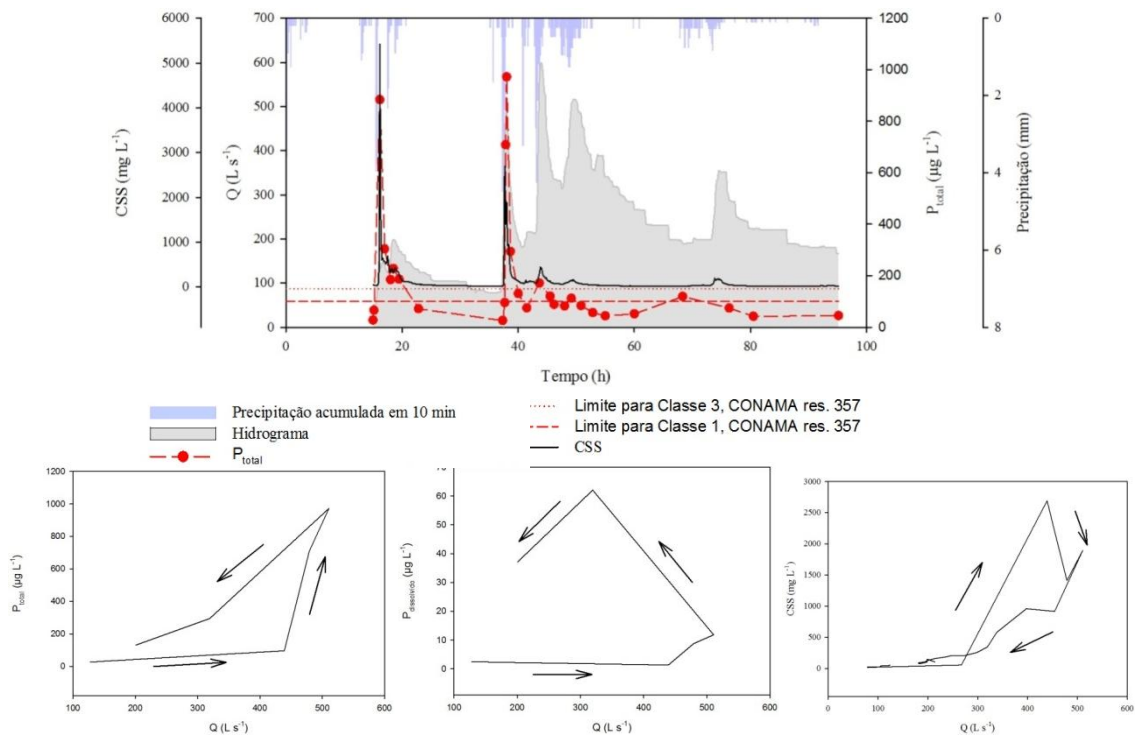
### Evento do dia 26/10/2013



### Evento do dia 07/07/2015



### Evento do dia 12/07/2015

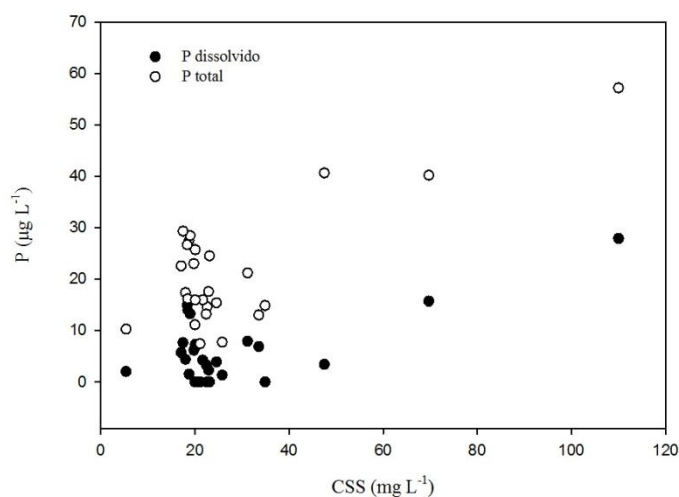


Apesar dos eventos dos dias 07/07/2015, 12/07/2015 terem ocorridos em dias muito próximos, as transferências de P total e de sedimentos apresentaram comportamentos bem distintos. Ambos os eventos acontecerem no momento em que o solo se encontra pouco exposto, devido a presença de plantas esporádicas. Contudo houve continua perda de sedimento e de P total, isso se deve a baixa intensidade da chuva do dia 08/07/2015. Já o evento do dia 12/07/2015 houve momentos com elevada intensidade de precipitação, gerando grandes transferências de sedimento nas primeiras 40 horas do evento. Após esse momento, apesar de nova elevação da vazão, as concentrações de P total e de sedimento sofrem pouca variação.

Dos nove eventos em que houveram coletas, apenas nas amostras de 8 deles foi determinado o teor de P total. Destes, sete apresentaram concentração total de P, em pelo menos um momento do evento com valores superiores a  $0,15 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 2), já sendo suficientes para enquadramento a água na classe 3 do Conama nº 357. As concentrações variaram de  $0,085 \text{ mg L}^{-1}$  até  $1,466 \text{ mg L}^{-1}$  este último quase 10 vezes acima do limite de enquadramento para a classe 3 da resolução do CONAMA. Geralmente, concentrações de  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$  de P são adequadas para manutenção do fitoplâncton; no entanto, quando superar  $0,03 \text{ mg L}^{-1}$  pode desencadear o seu crescimento desenfreado (USEPA, 1996).

Os teores de P total, embora usado pelo CONAMA, não são bons indicadores do grau de contaminação da água e tampouco indicador do grau de eutroficação. Há muitos casos onde não há relação entre teor total e teor dissolvido, verdadeira forma disponível à vida aquática, como pode ser observado no presente estudo. Várias amostras de água + sedimento, cujos valores de fósforo total eram próximas de  $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ , continham concentrações de P dissolvido variando de  $0,001$  até  $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ . O não aparecimento de problemas visíveis de eutroficação, apesar de teores elevados de P, pode ainda estar relacionado ao fato de se tratar de ambiente lótico, cuja permanência do fósforo no local do rio é muitíssimo curto. Em poucas horas após cessar o evento pluviométrico, os valores de fósforo total ou dissolvido na água caem à níveis tão baixos que a água se enquadra na Classe 1 do CONAMA, apesar de baixo os fluxos de P total e dissolvido permanecem constantes entre os eventos (Figura 3). Contudo o fósforo oriundo do solo está sendo transferidos ao longo dos arroios e certamente chegará aos mananciais de água a jusante, em especial no Estuário do Guaíba, Lagoa dos Patos e no Oceano Atlântico.

Figura 3 – Concentração de fósforo total e dissolvido nas amostras coletadas durante o fluxo de base entre coletados quinzenalmente de setembro de 2011 a setembro de 2012.



O P total apresentou os maiores picos nas amostras coletadas nos pontos mais próximos durante a vazão máxima do evento coincidindo com o aumento da concentração de sedimentos em suspensão. Este fato era esperado em função de sua forte adsorção aos colóides do solo, assim esforços na redução da erosão, promovem uma diminuição nas perdas por sedimentos e conseqüentemente a transferência de P.

## 5.2 Formas de p perdido durante os eventos

### 5.2.1 Relação entre concentração e fósforo *versus* vazão

As correlações entre as concentrações de P particulado e P dissolvido com a vazão são apresentados na Tabela 4. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que o modelo de regressão só explica 18,1% da variação das concentrações de respectivas de P particulado e P dissolvido em função da vazão. Esses resultados corroboram com trabalhos da literatura que encontraram baixas correlações dessas variáveis (IDE et al., 2008; IDE et al., 2009; RODRÍGUEZ-BLANCO et al., 2010). O fenômeno da histerese entre vazão e as formas de P (Particulado e dissolvido) são responsáveis pelo baixo coeficiente de correlação.

Tabela 4: Equação de regressão entre concentração de sedimentos em suspensão, fósforo particulado e fósforo dissolvido *versus* vazão.

Equação	$R^2$	n	p
P particulado=0,160 Q + 141,5	0,19	96	<0,0001
P dissolvido= 0,009 Q+18,83	0,01	96	<0,0001
P particulado=0,246CSS+ 136,8	0,43	96	<0,0001
P dissolvido=0,004 CSS+ 21,85	0,01	96	<0,0001

Onde: P particulado e dissolvido estão em  $\mu\text{g L}^{-1}$ ; a vazão (Q) está em  $\text{L s}^{-1}$ ; a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) está em  $\text{mg L}^{-1}$ .

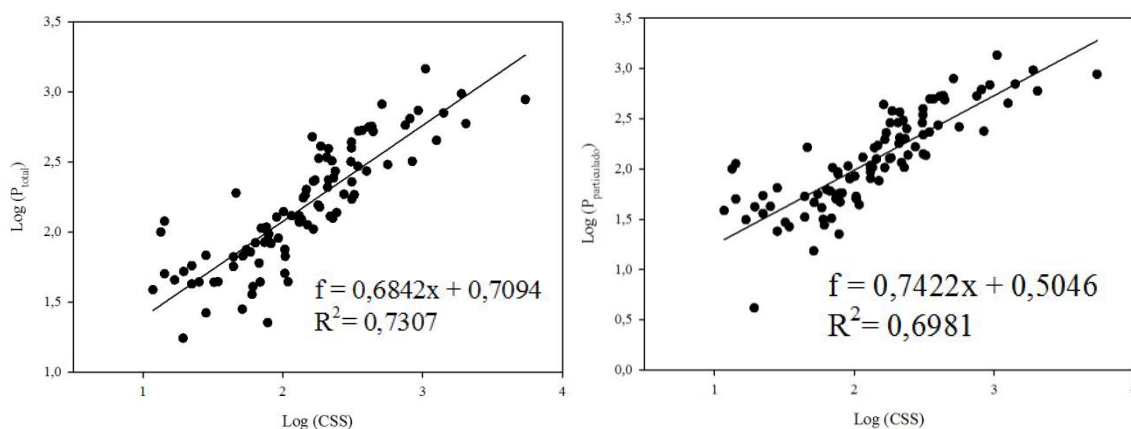
### 5.2.2 Relação entre transporte de concentração de sedimentos em suspensão e formas de fósforo

Em ambientes tropicais os solos possuem alta afinidade por P fazendo com que o elemento se liga aos compostos metálicos através de ligações químicas de alta energia e altamente estáveis em sistemas oxidados, devido a esse fenômeno em média 88% do P perdido no escoamento encontra-se na forma particulada e apenas 12% na forma dissolvida. Contudo essas ligações podem ser desfeitas em ambientes reduzidos, provocando a dessorção do P ligado ao sedimento. Estes percentuais revelam que, na bacia de Arvorezinha o P é transportado em formas de partículas, o que indica que a erosão do solo controla a transferência de P para a água. Esses resultados são consistentes com os encontrados por Rodríguez-Blanco et al. (2010) onde

o P particulado foi a forma predominante no total de P transportado (84%), em eventos numa bacia hidrográfica na Espanha. As diferenças de P particulado perdidos podem ser explicadas pela variabilidade dos processos de erosão de cada evento.

Na Figura 4 podemos observar uma boa correlação entre as variáveis P total e P particulado e CSS, que pode ser atribuída a alta afinidade do P aos colóides do solo, sobretudo em solos mais intemperizados. Este fato sugere que a maior parte do P que atinge o fluxo está associada ao transporte de sedimentos, uma vez que em. As altas concentrações de CCS foram observadas logo após pico na intensidade da chuva (acima de  $24 \text{ mm h}^{-1}$ ), o que pode ter sido capaz de transportar partículas de solo mais grosseiras e agregados de argila, com menor capacidade de adsorção de P, reduzindo a razão entre CSS e P particulado. Na Figura 2, podemos perceber que nos eventos do dia 20/09/2013 e 12/07/2015 ocorre um aumento da relação entre sedimento perdido *versus* P total perdido, que pode ser atribuído a alta intensidade da chuva que foi capaz de mobilizar partículas mais grosseiras de solo com teores mais baixos de P. Esses resultados corroboram com o trabalho de Bortoluzzi et al. (2013), que encontrou menores teores de P no sedimento do pico do evento, momento em que houve a maior CSS e maior presença de sedimentos com partículas de tamanho areia e assim menor capacidade de adsorção de P.

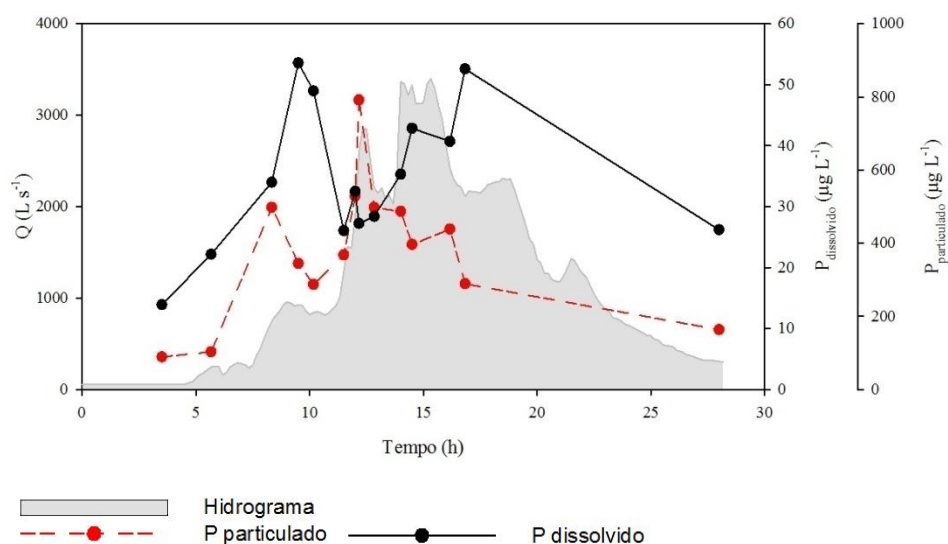
Figura 4 – Relação entre fósforo total e fósforo particulado em função da concentração de sedimentos em suspensão.



As concentrações do P dissolvido foi a mais variável durante os eventos ocorridos nos dias: 12/03/2013, 26/10/2013 e 08/07/2015. Houve aumento gradual do P dissolvido, acompanhando o comportamento do P particulado. No entanto o pico de P dissolvido foi verificado no ramo crescente do hidrograma pouco antes do pico de P particulado. Nesses

eventos o escoamento da água subsuperficial deve estar contribuindo para o aumento da forma dissolvido e a dessorção ou solubilização do P particulado. Contudo, nos eventos dos dias 01/10/2011, 06/07/2012, 12/07/2015, o pico do fósforo dissolvido ocorreu no momento de recessão do hidrograma, após o pico do fósforo particulado indicando a ocorrência da dessorção ou solubilização do P particulado durante o transporte. No evento do dia 21/07/2011 observou-se dois picos de P dissolvido ambos após picos de P particulado (Figura 2). O segundo pico de P dissolvido apresentou concentração próxima em relação ao primeiro, apesar do aumento da CSS e do P particulado. Nesse caso, pode ter ocorrido transporte inicialmente de partículas de solo mais ricas em P. Durante o evento podemos perceber que as concentrações de P não acompanharam o aumento do hidrograma.

Figura 5 – Variação entre fósforo dissolvido e fósforo particulado durante o evento do dia 21/07/2011



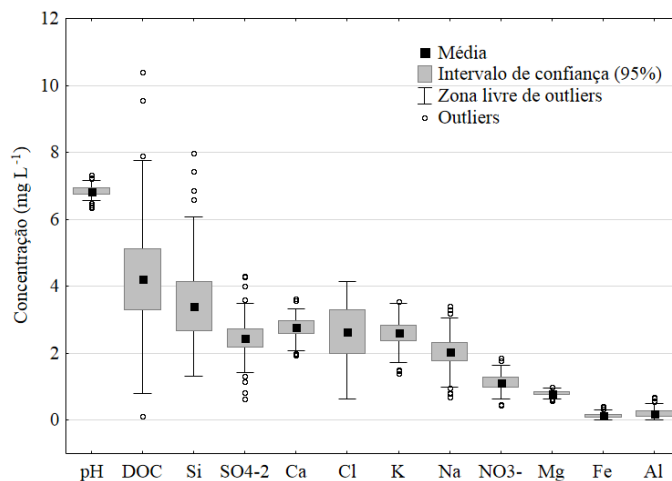
### 5.2.3 Especificação química do P dissolvido

Os dados analíticos dos parâmetros químicos da água do arroio usados para estimar as espécies químicas através do VisualMinteq estão apresentados na Figura 6. Os resultados da especificação (Figura 7) mostram que mais de 99% da massa total do P dissolvido encontra-se distribuído em uma das seguintes formas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{CaHPO}_4$  (aq),  $\text{MgHPO}_4$  (aq),  $\text{AlHPO}_4^+$ . Durante todos os eventos houve predominância das formas livres ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) que juntas representaram de 88,6% até 99,1% da massa total de P dissolvido na água, evidenciando potencial de contaminação do fósforo. Esses resultados corroboram com os resultados Berretta; Sansalone (2011), que estudando a transferência de espécies químicas de P

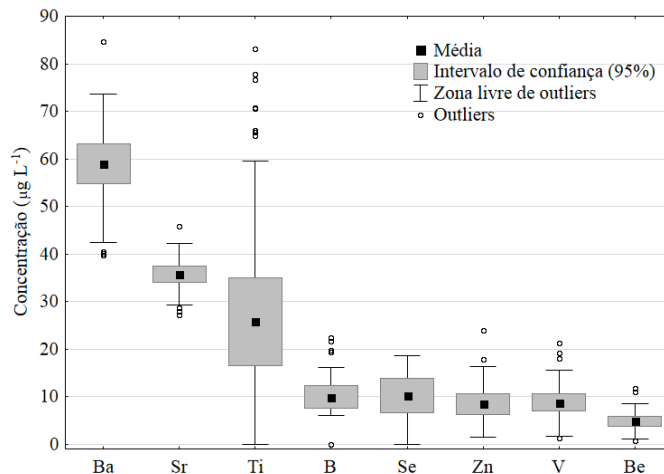


em eventos chuva-vazão em uma pequena bacia urbana de captação em Gainesville, FL, EUA verificaram que o P dissolvido na água encontrava-se predominantemente na forma livre onde mais de 90% da massa total de P encontrava-se na forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ou  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Houve predominância de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em relação  $\text{HPO}_4^{2-}$  ocorrendo com maior frequência sempre que o pH da água estava abaixo de 7,17. Em pH mais alcalino a forma  $\text{HPO}_4^{2-}$  é a mais comum (Figura 7). A distribuição das formas dos íons fosfato em função do pH da água já foram descritas por Buehrer (1932) contudo como o fósforo disponível pode se ligar a íons metálicos, a compostos orgânicos, ou apresentar-se na forma de precipitados, apareceram ruídos na distribuição das formas livres, sendo mais significativos em valores mais baixos de pH da água, onde a concentração da espécie  $\text{AlHPO}_4^+$  aumenta.

Figura 6 - Características químicas dos eventos coletados entre junho de 2011 e março de 2013, na bacia de Arvorezinha, RS, Brasil.



Obs: O pH não está expresso em mg L<sup>-1</sup>



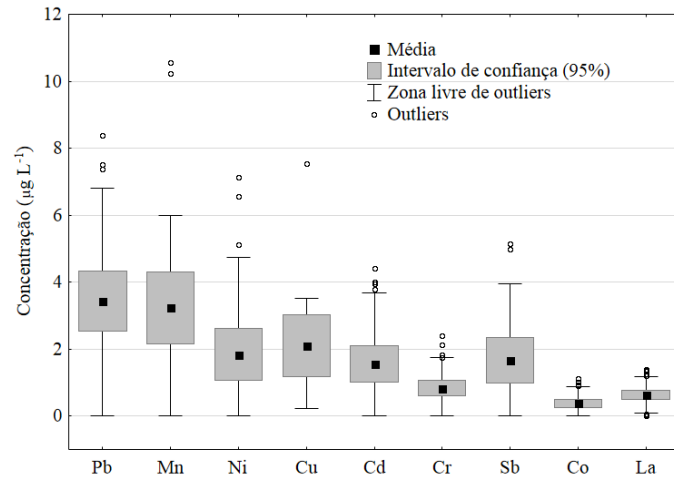
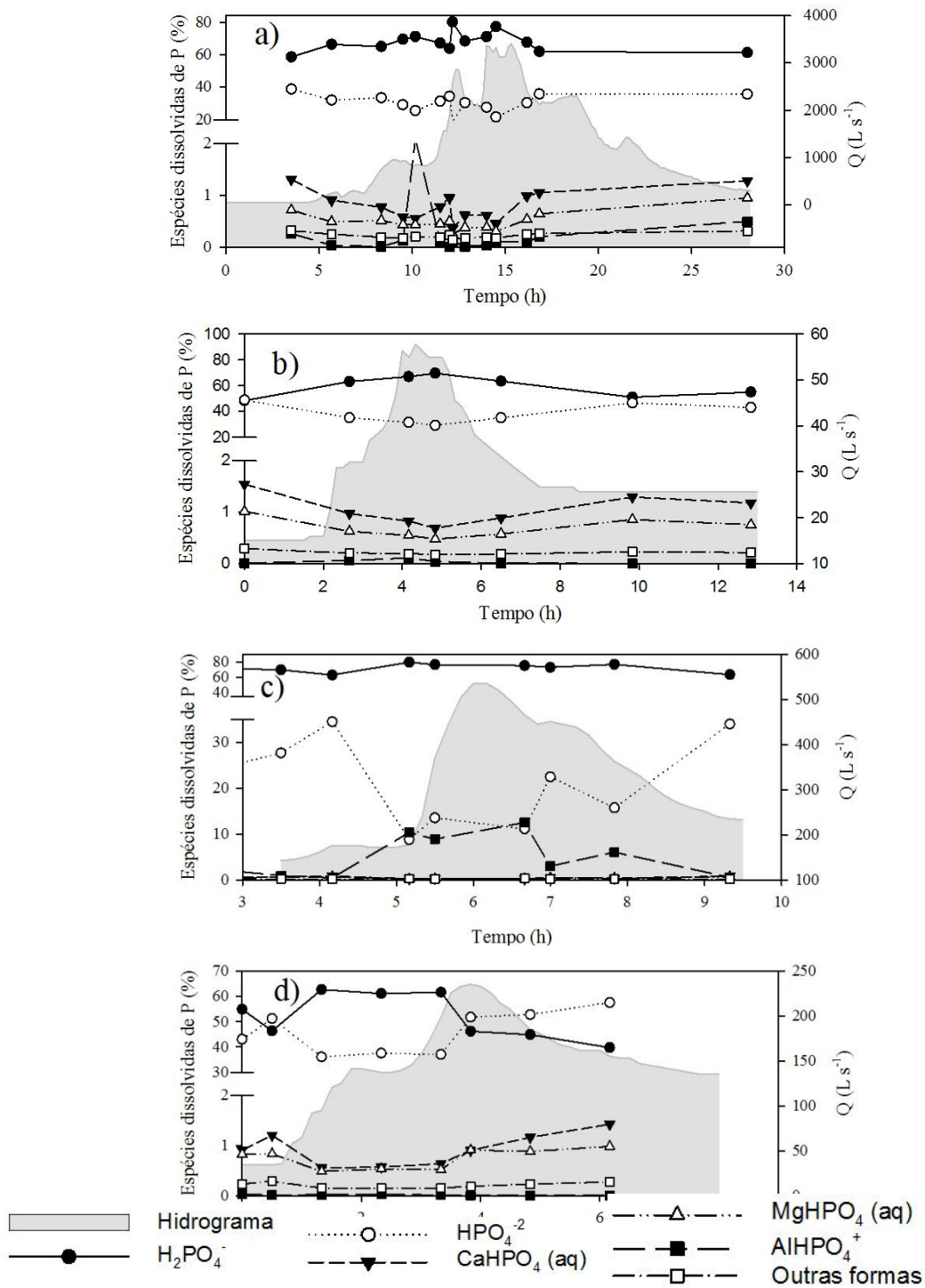


Figura 7—Comportamento das espécies de fósforo dissolvido, expressos em percentagem da massa total, e hidrograma de quatro eventos.



Onde: a) evento do dia 20.7.2011; b) evento do dia 01.10.2011; c) evento do dia 06.07.2012; d) evento do dia 12.03.2013.

As formas secundárias de P dissolvido encontradas foram:  $\text{AlHPO}_4^+$ ,  $\text{CaHPO}_4$  (aq) e  $\text{MgHPO}_4$  (aq). Berretta; Sansalone (2011), em seu estudo apontou a contribuição importante de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  e secundária de  $\text{CaHPO}_4$  (aq) e  $\text{MgHPO}_4$  (aq). A pouca importância do  $\text{AlHPO}_4^+$  em seu trabalho pode estar associada ao pH das amostras, os quais variaram entre 6,41 e 8,55, estando muito acima da média do nosso estudo. Podemos observar que com o aumento do pH ocorre diminuição dos teores de  $\text{AlHPO}_4^+$ .

Como visto acima podemos observar que a importância relativa das diferentes formas na massa total de P dissolvido pode variar entre os eventos e durante os mesmos, dependendo principalmente do pH da água. O pH é a principal variável que afeta a distribuição das diferentes espécies de P na água (BERRETTA; SANSALONE, 2011). Podemos separar a importância relativa de cada espécie em um determinado intervalo de pH conforme segue:

- pH entre 6,21 e 6,66  $\text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{HPO}_4^{2-} > \text{AlHPO}_4^+ > \text{CaHPO}_4$  (aq) >  $\text{MgHPO}_4$  (aq);
- pH entre 6 e 7,17  $\text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{HPO}_4^{2-} > \text{CaHPO}_4$  (aq) >  $\text{MgHPO}_4$  (aq) >  $\text{AlHPO}_4^+$ ;
- pH entre 7,17 e 7,33  $\text{HPO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{CaHPO}_4$  (aq) >  $\text{MgHPO}_4$  (aq) >  $\text{AlHPO}_4^+$ .

Nas condições de pH mais baixos começa a aumentar a importância relativa de P na forma de  $\text{AlHPO}_4^+$ , podendo representar mais de 10% do total de P dissolvido. Devido a formação de precipitados, parte do P não estará disponível a menos que ocorram novas mudanças de pH na água. Já as concentrações de  $\text{CaHPO}_4$  (aq),  $\text{MgHPO}_4$  (aq) tendem a aumentar com a elevação do pH. Contudo a contribuição máxima de  $\text{CaHPO}_4$  (aq),  $\text{MgHPO}_4$  (aq) foi de 1,5% e 1,0%, respectivamente do total da massa do P dissolvido, tendo pouca importância na precipitação do P dissolvido.

### 5.3 Histerese das formas de fósforo

#### 5.3.1 Histerese entre vazão e concentração de fósforo dissolvido

Verificou-se em todos os oito eventos monitorados uma forte histerese entre as variáveis. Indicando claramente que o comportamento da mobilização de P e de sedimentos ocorrem em função de uma complexa interação entre os três tipos de escoamento, bem como da disponibilidade de material na bacia e sua proximidade ao exutório. Considerando os resultados apresentados na Tabela 5, a maior transferência de P dissolvido ocorreu nos escoamentos subsuperficial e superficial (Tabela 5). Como foi descrito anteriormente, essas inferências são baseadas nas características do laço de histerese, tal como proposto por Evans e Davies (1998).

Tabela 5 – Resultado da análise de histerese entre descarga líquida e fósforo dissolvido.

Evento	Tipo	Sentido	Curvatura	Inclinação	Componentes
20/07/2011	A2	Anti-horário	Côncava	Positiva	$C_{ESS} > C_{ES} > C_{EST}$
01/10/2011	A2	Anti-horário	Côncava	Positiva	$C_{ESS} > C_{ES} > C_{EST}$
06/07/2012	A2	Anti-horário	Côncava	Positiva	$C_{ESS} > C_{ES} > C_{EST}$
12/03/2013	C2	Horário	Côncava	Positiva	$C_{ES} > C_{ESS} > C_{EST}$
20/09/2013	-	-	-	-	-
26/10/2013	A2	Anti-horário	Côncava	Positiva	$C_{ESS} > C_{ES} > C_{EST}$
23/07/2014	-	-	-	-	-
08/07/2015	C2	Horário	Côncava	Positiva	$C_{ES} > C_{ESS} > C_{EST}$
12/07/2015	A2	Anti-horário	Côncava	Positiva	$C_{ESS} > C_{ES} > C_{EST}$
12/07/2015*	A2	Anti-horário	Côncava	Positiva	$C_{ESS} > C_{ES} > C_{EST}$

Onde:  $C_{ESS}$ : concentração do soluto no escoamento subsuperficial;  $C_{ES}$ : concentração do soluto no escoamento superficial do evento;  $C_{EST}$ : concentração do soluto na água subterrânea.

\*O evento do dia 12/07/2015 apresentou dois momentos de ascensão e recessão do hidrograma com formação de duas histereses.

O comportamento de histerese do dia 26/10/2013(Tabela 5), classificada como *anti-horário, côncava, positiva* - A2, parece ser o predominante na bacia hidrográfica estudada. Nessa classificação, a maior contribuição de P dissolvido ocorre pelo escoamento subsuperficial, seguido pelo escoamento superficial. O outro padrão encontrado é aquele encontrado nos eventos dos dias 12/03/2013, 08/07/2015 e primeira histerese do dia 12/07/2015, nesses casos o comportamento foi classificado como *horário, côncava, positiva* - A2, nos quais a maior contribuição de P dissolvido ocorre pelo escoamento superficial do evento, seguido pelo escoamento subsuperficial.

Naturalmente a contribuição do escoamento subterrâneo para a transferência do fósforo é baixa, já que esses fluxos transpassam a matriz do solo lentamente condicionando a adsorção pela matriz do solo. (Figura 2). As amostras coletadas nos intervalos entre os eventos, que representam o fluxo subterrâneo, apresentaram concentrações média de P dissolvido de 0,0059 mg L<sup>-1</sup>. Os resultados mostram que apesar de baixos, os fluxos de transferência de P dessa componente é contínuo. Contudo, tal como comprovado pelas concentrações e formas de histerese, durante os eventos pluviométricos que a mobilização é mais expressiva, tal como sugerido por McDowell; Sharpley; Condren (2001) e Gonçalves (2003). A baixa contribuição do escoamento subterrâneo para o transporte de P dissolvido já era esperado em função das

características do solo da bacia estudada. Este fato pode ser explicado pelas características dos solos: são como são solos tropicais e intemperizados e possuem grande afinidade por P não permitindo que haja a lixiviação do nutriente para o lençol freático. A contribuição do escoamento subterrâneo pode acontecer em solos com capacidade limitada de reter P devido à baixa capacidade de adsorção do solo (DONN; BARRON; BARR, 2012). Importante salientar a elevada contribuição do escoamento subsuperficial desta bacia para o padrão de fósforo encontrado. Esse resultado corrobora com o processo descrito por Barros (2016) para essa mesma bacia. A autora utilizou a variabilidade temporal do silício dissolvido, como traçador natural durante o evento, para separar quantitativamente o escoamento superficial do escoamento subsuperficial. Os resultados demonstram claramente a preponderância do escoamento subsuperficial para o volume total escoado na bacia. A água proveniente do escoamento subsuperficial é uma massa que este em contato com a solução do solo por um tempo maior na sua trajetória em direção ao exutório da bacia. Mesmo que apresente menor velocidade de propagação, em comparação com o escoamento superficial, e, por isso, menor potencial de escoamento superficial, essa massa tem maior habilidade de carrear substâncias (nutrientes, pesticidas, etc.) que estão nas camadas superiores do solo. Indicando assim, a sua grande importância ambiental em termos de potencial de contaminação. Esse processo implica na importância e necessidade da interceptação desse fluxo por uma ampla e efetiva zona de raízes entre a encosta e a rede de drenagem que pode ser estabelecida por faixas de retenção “*buffer strips*” e pela mata ciliar, especialmente por uma vegetação com sistema de raízes abundantes.

### 5.3.2 Histerese entre vazão e concentração de fósforo total e concentração de sedimentos em suspensão

Analisando a relação entre Q e CSS na bacia hidrográfica de Arvorezinha verificou-se a predominância de histerese com laço no sentido horário. Esse comportamento foi observado nos eventos ocorridos nos dias 20/07/2011, 06/07/2012, 12/03/2013, 07/07/2015 e 12/07/2015, onde concentrações de CSS aumentaram com a elevação da Q além de atingir o pico de concentração mais rápido do que da Q. Isto indica que a fonte disponível de sedimentos para a transferência até o canal fluvial é limitada a fontes próximas do mesmo, ocorrendo a queda na transferência de sedimento, quando o hidrograma ainda estiver em ascensão ou pico (BARROS, 2016). Esse comportamento havia sido descrito por Minella et al. (2011) e, posteriormente, por Barros (2012) que analisaram a transferência de sedimentos em eventos monitorados de 2002

até 2008, e o período de 2009 a 2011. Em quatro destes cinco eventos onde ocorreram histerese com laço no sentido horário para CSS observou-se histerese com laço, no mesmo sentido para P total (Figura 2), indicando que as fontes de P se encontram próximas ao canal para esses eventos. O pico de concentração de P ocorreu quando o hidrograma ainda se encontrava em ascensão. Comportamento semelhante entre a histerese de CSS e P total se deve a boa correlação entre essas variáveis, esse comportamento foi observado por Ramos et al. (2015), que encontrou o mesmo padrão de histerese de CSS e P total. Esses cinco eventos possuem em comum o fato de terem ocorrido no momento em que o solo está pouco exposto, reduzindo a quantidade de sedimento disponível e ocasionando a do transporte de sedimento e P ao longo do evento.

Os eventos do dia 01/10/2011, 20/09/2013, 26/10/2013 apresentaram comportamento diferente dos demais. O evento do dia 01/10/2011 revelou menor magnitude entre os eventos avaliados apresentando um formato de histerese do tipo 8 para CSS, nesse caso a concentração de sedimentos em suspensão atingiu o pico, antes do pico da vazão. Após atingir o pico a disponibilidade, houve um aumento no transporte de sedimentos suficientemente elevado fazendo com que a CSS RD reduzisse lentamente com o tempo, enquanto a Q decresceu mais rapidamente. Este comportamento já havia sido observado por Minella et al. (2011), em evento de chuva de baixa magnitude na mesma bacia estudada. No evento dos dias 20/09/2013 e 26/10/2013 houve uma sincronização entre CSS e vazão, apresentando histerese do tipo valor único. Como o solo encontrava-se exposto a intensidade da precipitação foi suficiente para transportar continuamente o sedimento. Esses três eventos apresentaram histerese de P total no sentido anti-horário, indicando uma chegada mais lenta do sedimento mais rico em P. Desta forma no momento em que o solo se apresenta susceptível à erosão, há P disponível para ser mobilizado, podendo ser e transportado para os mananciais aquáticos.

Diversos trabalhos mostram a ocorrência de histerese entre as concentrações de P total e a vazão, Bowes et al. (2015) em seu estudo associou o aparecimento de histerese no sentido horário a rápida mobilização e transporte de P para o local monitorado. Devido ao armazenamento de P ao longo das margens não descartou a influência da movimentação do sedimento de fundo para a rápida mobilização de P. Contudo a predominância do laço de histerese em nosso estudo parece estar mais relacionada ao esgotamento de sedimento e P principalmente quando o solo apresenta alguma cobertura.

Tabela 6 – Resultado das variáveis hidrológicas e da histerese de fósforo total e concentração de sedimento em suspensão, para os eventos monitorados na bacia hidrográfica de Arvorezinha

Data do evento	Precipitação mm	Q max L s-1	Q min L s-1	Q cen L s-1	CSS RC mg L-1	CSS RD mg L-1	IH CSS	Histerese CSS	P Total RC µg L-1	P Total RD µg L-1	IH PT	Histerese P total
20/07/2011	127,0	3399	55	1711	551	183	2,01	Horário	510	303	0,68	Horário
01/10/2011	17,0	58	15	36	68	110	-0,61	8	50	73	-0,45	Anti-horário
06/07/2012	57,38	536	143	340	188	49	2,82	Horário	263	105	1,52	Horário
12/03/2013	26,3	236	34	135	182	52	2,53	Horário	123	67	0,84	Horário
20/09/2013	84,0	576	42	309	395	383	0,03	Linha simples	265	230	0,15	Anti-horário
26/10/2013	35,8	464	122	293	420	349	0,20	Linha simples	383	475	-0,24	Anti-horário
08/07/2015	52,1	536	80	308	209	19	9,80	Horário	177	68	1,60	Horário
12/07/2015*	15,1	600	51	125	2	657	-0,97	-	705	72	8,79	Horário
12/07/2015**	11,3	510	128	272	737	344	1,14	Horário	69	294	-3,26	Anti-horário

\*primeiro pico do evento do dia 12/07/2015, \*\* segundo pico do evento do dia 12/07/2015. Onde: Q max é a vazão máxima, Q min é a vazão mínima, Q cen é a vazão central, CSS RC é a concentração de sedimentos em suspensão para Q cen no ramo crescente o hidrograma, CCS RD é a concentração de sedimentos em suspensão para Q cen no ramo decrescente o hidrograma. P total RC é a concentração P total para Q cen no ramo crescente o hidrograma, P total RD é a concentração P total para Q cen no ramo decrescente o hidrograma.



Os eventos apresentaram uma grande variabilidade nos valores calculados do IH para CSS e P total, com valores médios de 1,88 e 1,07 respectivamente. Estes fatos indicam que para nos eventos coletados houve predomínio de picos de sedimento e P total, antecedendo o pico de vazão, mas com variabilidade dentro desta condição. Podemos visualizar na Tabela 6 que no período em que o solo foi mobilizado para o cultivo de tabaco, o mesmo encontrava-se exposto. Verifica-se que o IH médio caiu para CSS, passando de 2,88 para -0,12, já para o P total os valores reduziram de 1,69 para -0,18. Estes valores podem ser explicados pelo processo de mobilização realizado no solo, o qual, aumentou a quantidade de sedimento e P disponível aumentando o aporte destes para a calha fluvial. A atividade agrícola condiciona um aumento da disponibilidade de sedimento e P pelo revolvimento do solo e geração de depósitos, próximos e dentro do canal fluvial (BOWES et al., 2005). Desta forma, não ocorre a diminuição do transporte de P e de sedimento durante o evento, reduzindo o valor do índice de IH.

O evento do 20/09/2013 apresentou menor IH para CSS e P total (0,03 e 0,15 respectivamente) quando comparado ao evento do dia 06/07/2012 (2,82 e 1,52). Apesar de menor magnitude do evento do dia 06/07/2012 ocorreu diminuição no transporte de sedimento e P, aumentando o IH. Contudo, para que seja possível uma melhor comparação do IH são necessários que mais eventos sejam observados para a quantificação e separação da contribuição da precipitação e do manejo, que afetam a variabilidade deste índice. O evento do dia 12/07/2015 ocorreu cinco dias após o evento do dia 08/07/2015 e apresentou redução da IH da CSS. Isto deve-se ao aumento do conteúdo de água no solo, determinando que novas fontes de sedimentos sejam incorporadas a toda a bacia vertente (LAWLER et al., 2006). O IH do P total reduziu somente após o segundo pico da vazão, ocorrida no evento do dia 12/07/2015, indicando a predominância na mobilização de sedimento com baixas concentrações de P no primeiro momento do evento.

Além da complexidade do fenômeno da eutroficação, ainda ocorre o problema do distanciamento espaço-temporal entre a fonte causadora e o local onde se manifestam as consequências, o que resulta na falta de ações no ambiente onde se desencadeia o processo. Este trabalho mostra que durante os eventos uma grande quantidade de P (solúvel e particulado) oriundo das áreas agrícolas na cabeceira do Jacuí são transportados para os mananciais. O P da bacia de Arvorezinha pode estar sendo mobilizados para mananciais a jusante em especial no Estuário do Guaíba, Lagoa dos Patos e contribuindo para a ocorrência desse problema. Assim esforços na adoção de práticas que diminuam a

erosão em bacias hidrográficas nas cabeceiras do Taquari e Jacuí podem contribuir para a diminuição da eutroficação do Estuário do Guaíba e da Lagoa dos Patos.

## 6 CONCLUSÕES

As perdas de fósforo (particulado e dissolvido) durante os eventos são muito superiores às do fluxo de base, quase sempre ultrapassando os limites da Classe 3da resolução do CONAMA. Assim é necessário a inclusão de um monitoramento mais detalhado nos rios para conhecer o real estado trófico dos mesmos, e não subestimar o transporte de fósforo.

Em ambientes tropicais os solos possuem alta afinidade por fósforo se ligando aos compostos metálicos através de ligações químicas de alta energia, isso fez com que 88% do fósforo transferido na bacia de Arvorezinha estava na forma particulada. Contudo essas ligações podem ser desfeitas em ambientes reduzidos, provocando a dessorção do fósforo ligado ao sedimento e assim tornando-se biodisponível para as cianobactérias. Dessa forma os esforços para diminuir a erosão são fundamentais para a diminuição do transporte de fósforo particulado.

O fósforo dissolvido é transportado predominantemente na forma livre, forma totalmente biodisponível para a biota aquática.

Houve predomínio de picos de sedimento e fósforo total, antecedendo o pico de vazão. Durante o final do inverno e durante a primavera, quando o solo se encontra mais exposto houve o transporte contínuo do fósforo durante o evento. A atividade agrícola condiciona um aumento da disponibilidade de sedimento e fósforo pelo revolvimento do solo podendo gerar depósitos próximos e dentro do canal durante as precipitações.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARGENTA, D. P. B.; PANTE, A. R.; MERTEN, G. H.; FLORIANO, R. F. c. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., 2001, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2001.

BARROS, C. A. P. DE et al. Description of hydrological and erosion processes determined by applying the LISEM model in a rural catchment in southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1298–1310, 9 mai. 2014b.

BARROS, C. A. P. DE et al. Estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 557–564, abr. 2014a.

BARROS, C. A. P. DE. **Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural com técnicas de monitoramento e modelagem**. [s.l.] 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

BARROS, C. A. P. DE. **Dinâmica dos escoamentos na modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia rural**. [s.l.] 2016. 193 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

BERRETTA, C.; SANSALONE, J. Speciation and Transport of Phosphorus in Source Area Rainfall–Runoff. **Water Air Soil Pollut**, v. 222, n. 1, p. 351–365, 10 jun. 2011.

BIEROZA, M. Z.; HEATHWAITE, A. L. Seasonal variation in phosphorus concentration–discharge hysteresis inferred from high-frequency in situ monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 333–347, mai. 2015.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Mineralogy and nutrient desorption of suspended sediments during a storm event. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 6, p. 1093–1105, 24 abr. 2013.

BOWES, M. J. et al. Characterising phosphorus and nitrate inputs to a rural river using high-frequency concentration–flow relationships. **Science of the Total Environment**, v. 511, p. 608–620, 14 Jan. 2015.

BOWES, M. J. et al. Phosphorus–discharge hysteresis during storm events along a river catchment: the River Swale, UK. **Water Research**, v. 39, n. 5, p. 751–762, mar. 2005.

BUEHRER, T. F. **The Physico-Chemical Relationships of Soil Phosphates**. Universidade do Arizona, Tucson, Arizona p. 212, 30. jun. 1932.

CAPOANE, V. et al. Transferência de nitrogênio e fósforo para águas superficiais em uma bacia hidrográfica com agricultura e produção pecuária intensiva no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v.45, n.4, abr, 2015.

CORRELL, D. L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. **Journal of Environmental Quality, Madison**, v.27, p.261-266, 1998.

DALBIANCO, L. **Simulação hidrossedimentológica com o Modelo LISEM em uma pequena bacia hidrográfica rural**. [s.l.] 2013. 91 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural**. [s.l.] 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

DANIEL, T. C.; SHARPLEY, A. N.; LEMUNYON, J. L. Agricultural phosphorus sand eutrophication: A symposium overview. **Journal Environmental Quality, Stanford**, v. 27, n. 2, p.251–257, Mar.–abr. 1998.

DICK, D. P.; GOMES, J.; ROSINHA, P. B. Caracterização de substâncias húmicas extraídas de solos e de lodo orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 603–611, 1998.

DONN, M. J.; BARRON, O. V.; BARR, A. D. Identification of phosphorus export from low-runoff yielding areas using combined application of high frequency water quality data and MODHMS modeling. **Science of the Total Environment**, v. 426, p. 264–271, 12 Abr. 2012.

EVANS C.; DAVIES.T. D. Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. **Water Resources Research**, v. 34, n. 1, p. 129–137, jan. 1998.

GONÇALVES, C. S. **Qualidade de águas superficiais na microbacia hidrográfica do arroio Lino Nova Boêmia – Agudo – RS**. 2003, 114f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GRIMM, D. M. et al. Continuous multiligand distribution model used to predict the stability constant of copper (II) metal complexation with humic material from fluorescence quenching data. **Environmental Science and Technology**, v.25, n. 8 p.1427–1431, ago. 1991.

GUARDINI, R. et al. Phosphorus accumulation and pollution potential in a hapludult fertilized with pig manure. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1333–1342, Jul.–Aug. 2012.

GUSTAFSSON, J.P. Visual Minteq. Acesso em: 07 jun. 2016. Online. Disponível em: <http://vminteq.lwr.kth.se/download/>.

HOROWITZ, A. J. Monitoring suspended sediment and associated trace element and nutrient fluxes in large river basins in the USA. **Sediment Transfer through the Fluvial System** (Proceedings of a symposium held in Moscow, v. 288, p. 419–428, Ago. 2004.

HOUSE, W. A.; WARWICK, M. S. Hysteresis of the solute concentration/discharge

relationship in rivers during storms. **Water Research**, v. 32, n. 8, p. 2279–2290, ago. 1998.

IDE, J. et al. Effects of antecedent rain history on particulate phosphorus loss from a small forested watershed of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*). **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 3–4, p. 322–335, 15 May 2008.

IDE, J. et al. Estimation of annual suspended sediment yield from a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantation considering antecedent rainfalls. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 9, p. 1955–1965, 16 abr. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário de 2006, Agricultura Familiar, primeiros resultados, Rio de Janeiro, 2009.

JONES, A. S. et al. Influence of Sampling Frequency on Estimation of Annual Total Phosphorus and Total Suspended Solids Loads. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 6, p. 1258-1275, dez. 2012.

KOCHEM, M. L. **Características granulométricas, carbono, nitrogênio e frações de fósforo em sedimentos durante eventos chuva-vazão em bacias hidrográficas no Rio Grande do Sul, Brasil**. [s.l.] 2014. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

LAWLER, D. M.; PETTS, G. E.; FOSTER, I. D. L.; HARPER, S. Turbidity dynamics and hysteresis patterns during spring storm events in an urban headwater system: The Upper Tame, West Midlands. **Science of the Total Environment**, Reino Unido, v.360, p.109-126, 2006.

LEFRANCOIS, J.; GRIMALDI, C.; GASCUEL-ODOUX, C.; GILLIET, N. Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. **Hydrological Processes**, v.21, n. 21, p.2923–2933, 4 Jul. 2007.

LI, H. et al. Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses. **Ambio**, v.44 n. 2, p. 274–285, 15 fev. 2015.

LLOYD, C. E. M. et al. Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments. **Science of the Total Environment**, v. 543, p. 388–404, 1 fev. 2016.

LOPES, F. **Utilização do modelo Century para avaliar a dinâmica do carbono do solo em uma pequena bacia hidrográfica rural**. [s.l.] 2006. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

MAIER, C. **Variabilidade intra-evento da origem das fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica rural**. [s.l.] 2013. 124 f. Tese (Doutorado em Recursos hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

MAINSTONE, C. P.; PARR, W. Phosphorus in rivers - ecology and management. **The Science of the Total Environment**, v. 282–283, p. 25–47, 23 Jan. 2002.

MATTHIENSEN, A.; YUNES, J. S.; CODD, G. A. Ocorrência, distribuição e toxicidade de cionobactérias no estuário da Lagoa dos Patos, RS. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 59, n. 3, p. 361-376.

MCDIFFETT, W. F., BEIDLER, A. W., DOMINICK, T. F., MCCREA, K. D. Nutrient concentration-stream discharge relationships during storm events in a 1st-order stream. **Hydrobiologia**, v. 179, n. 2, p. 97–102, Jul. 1989.

McDOWELL, R. W.; SHARPLEY, A. N.; CONDRN, L.M. Processes controlling soil phosphorus release to runoff and implications for agricultural management. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.59, n. 3, p.269–284, mai. 2001.

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**, v. 36, n. 2, p. 669–672, abr. 2006.

MINELLA, J. P. G. et al. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 12, p. 1819–1830, 15 jun. 2008.

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

MINELLA, J. P. G. **Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural**. [s.l.] 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Recursos hídricos e Saneamento Ambiental)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Porto Alegre, 2003.

MINELLA, J. P. G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e do manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica**. [s.l.] 2007. 172 f. Tese (Doutorado em Recursos hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN G. H.; MAGNAGO, P. F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p. 1306–1313, dez. 2011.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1575–1582, set. 2012

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; CLARKE, R. T. Método “fingerprinting” para identificação de fontes de sedimentos em bacia hidrográfica rural. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 633–638, out. 2009.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; RUHOFF, A. L. Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1455–1462, ago. 2010.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; WALLING, D. E.; REICHERT, J. M. Changing sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. **Catena**, v.79, n. 3, p. 228–236, 15 dez. 2009.

MINELLA, J. P. G.; WALLING, D. E.; MERTEN, G. H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. **Journal of Hydrology**, v. 348, n. 3-4, p. 546–563, jan. 2008.

MINELLA, J. P. G.; WALLING, D. E.; MERTEN, G. H. Establishing a sediment budget for a small agricultural catchment in southern Brazil, to support the development of effective sediment management strategies. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2189–2201, nov. 2014.

MORO, M. **Avaliação do modelo LISEM na simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma pequena bacia rural nas encostas basálticas do RS.** [s.l.] 2011. 133 f. Tese (Doutorado em Recursos hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

NADAL-ROMERO, E.; REGÜÉS, D.; LATRON, J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands. **Catena**, v.74, n. 2, p.127–136, 15 jul. 2008.

OLIVEIRA, F. P. DE et al. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 337–346, abr. 2012.

OLIVEIRA, F. P. DE. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica em bacia rural em Arvorezinha, RS, utilizando o WEPP.** [s.l.] 2010. 173 f. Tese (Doutorado em Recursos hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, v.40, n. 2, p.359–369, jun. 1989.

PELEGRINI, G. et al. O processo de colonização e a formação das unidades de produção familiares do Sul do Brasil. *In*. Tiecher, T. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no Sul do Brasil.** Frederico Westphalen: RS: URI – Frederico Westph, 2015a. Cap. 1, p.15–33.

PELEGRINI, J. B. R. et al. Conflitos entre a legislação ambiental, a aptidão agrícola e o uso dos solos em Unidades de Produção Familiar no Rio Grande do Sul. *In*. Tiecher, T. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no Sul do Brasil.** Frederico Westphalen: RS: URI – Frederico Westph, 2015b. Cap. 3, p.53–68.

PELEGRINI, 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, n. 3, p. 451–460, 20 ago. 2010.

RAMOS, T. B. et al. Sediment and nutrient dynamics during storm events in the Enxóe temporary river, southern Portugal. **Catena**, v. 127, p. 177–190, abr. 2015.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p.345–354, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J. & GATIBONI, L. C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6 p.1053–1059, nov.–dez. 2003.

RODRÍGUEZ-BLANCO, M. L.; TABOADA-CASTRO, M. M.; TABOADA-CASTRO, M. T. Sediment and phosphorus loss in runoff from an agroforestry catchment, NW Spain. **Land Degradation & Development**, v. 21, n. 2, p. 161–170, 6 ago. 2010).

ROSA, C. E. et al. Cyanobacterial blooms in estuarine ecosystems: Characteristics and effects on *Laeonereis acuta* (Polychaeta, Nereididae). **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, p. 956-964, jan. 2005.

ROSGEN, D. L. A classification of natural rivers. **Catena**, v. 22, n. 3, p. 169–199, Jun 1994.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.M. Iron Oxides. In: DIXON, J.B. & WEED S.B., eds. **Minerals in soil environments**. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p. 379–438.

SCHENATO, R. B. **Dinâmica do fósforo de sedimentos de uma pequena bacia hidrográfica de cabeceira**. [s.l.] 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

SEEGER, M.; ERREA, M.; BEGUERIA, S.; ARNAEZ, J.; MARTI, C.; GARCIA RUIZ, J. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. **Journal of Hydrology**, v.288, n. 3–4, p.299–311, 30 mar. 2004.

SHARPLEY A. N. et al. Future agriculture with minimized phosphorus losses to waters: Research needs and direction. **AMBIO**, v. 44, n. 2, p.163–179, 15 fev. 2015.

TIECHER, T et al. Forms of Inorganic Phosphorus in Soil under Different Long Term Soil Tillage Systems and winter Crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n.1, p. 271–281, jan. –fev. 2012.

TIECHER, T. et al. Combining visible-based-color parameters and geochemical tracers to improve sediment source discrimination and apportionment. **Science of the Total Environment**, v. 527–528, p. 135–149, 15 set. 2015.

TIECHER, T. et al. Tracing sediment sources in a subtropical rural catchment of southern Brazil by using geochemical tracers and near-infrared spectroscopy. **Soil & Tillage Research**, v.155, p. 478–491, jan. 2016.

TIECHER, T. **Fingerprinting sediment sources in agricultural catchments in southern Brazil**. [s.l.] 2015. 307 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. & COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal*, v. 48, p. 853–858, jul. 1984.

USEPA Environmental Protection Agency (USEPA). **Proposed guidelines for ecological risk assessment: Notice**. FRL–5605–9. Federal Register, 61, 47552–47631. 1996.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. [s.l.] 2009. 144 f. Dissertação (Mestrado em Recursos hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.

UZEIKA, T. et al. Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 557–565, abr. 2012.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. n. 148–57, 26 out. 2010.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**, v. 111, n. 1–4, p. 89–116, nov. 1989.

WITHERS, P. J. A.; JARVIE H. P. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review. **Science Of The Total Environment**, v. 400, n. 1–3, p. 379–395, 1 ago. 2008.

YANG, X. et al. Mechanisms and assessment of water eutrophication. **Journal of Zhejiang University Science B, Zhejiang**, v. 9, n. 3, p. 197–209, Mar. 2008.

YUNES, J. S. Florações de *Microcystis* na Lagoa dos Patos e o seu estuário: 20 anos de estudos. **Oecologia Australis**, v. 13, n. 2, p. 313-318, jun. 2009.

ZABALETA, A. et al. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. **Catena**, v. 71, n. 1, p. 179–190, 1 set. 2007.