

**AGNA LETÍCIA BOTELHO FIGUEIREDO**

**MOVIMENTO DE FÓSFORO POR MEIO DE ENXURRADA DA EROSÃO  
HÍDRICA: POSSÍVEIS EFEITOS AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências  
Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa  
Catarina no Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais, como requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Ildegardis Bertol

**LAGES, SC**  
**2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,  
com dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Figueiredo, Agna Letícia Botelho  
Movimento de fósforo por meio de enxurrada da erosão hídrica: Possíveis efeitos ambientais / Agna Letícia Botelho Figueiredo. – Lages, 2022.  
63 p.

Orientador: Ildegardis Bertol  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2022.

1. Erosão do solo. 2. Solo descoberto. 3. Arraste de fósforo. 4. Taxa de enriquecimento. I. Bertol, Ildegardis. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais. III. Título.

**AGNA LETÍCIA BOTELHO FIGUEIREDO**

**MOVIMENTO DE FÓSFORO POR MEIO DE ENXURRADA DA EROSÃO  
HÍDRICA: POSSÍVEIS EFEITOS AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais como requisito parcial para obtenção do título de Mestrado em Ciências Ambientais, da Universidade do Estado de Santa Catarina.

**Banca examinadora:**

**Orientador:**

---

**(Dr. Ildegardis Bertol)**  
**UDESC**

**Membros:**

---

**(Dr.<sup>a</sup> Cláudia Guimarães C. Campos)**  
**UDESC**

---

**(Dr. Luciano Gebler)**  
**EMBRAPA**

Dedico essa dissertação aos meus pais, Wilson  
Mota Figueiredo e Sonemeire Nunes Botelho,  
a minha vó Diná Botelho (in memorian),  
aos meus amigos, professores, alunos  
e colegas de trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram para a elaboração deste trabalho e conquista.

Ao professor Ildegardis Bertol pela orientação, dedicação, incentivo, paciência, transmissão de conhecimento e ajuda em todas as etapas deste estudo.

Aos meus pais Wilson Mota Figueiredo e Sonemeire Nunes Botelho por todo incentivo, apoio, dedicação e amor.

A minha família pelo carinho e apoio, mas principalmente a minha tia Dalila de Oliveira, meu irmão Felipe Botelho e minha vó Diná Botelho (in memorian).

A todos os amigos do laboratório de Uso e Conservação do Solo, principalmente a Marco Segalla, Filipe Wroblescki, Marco Fruhauf e Artur Kauling pela amizade, incentivo e ajuda na condução do experimento e ajuda nos trabalhos de campo.

A todos os amigos que fiz através da Universidade, em especial a Letícia Varela, Brayan Favarin, Carolina Barroco, Maryelle Fernandes, Márcio Anástacio, Arthur Mello, Natália Moraes, Natalia Letícia e Lucas Lazaro, pelo apoio em todos os momentos.

Às amizades que a cidade de Lages me proporcionou e se tornaram como uma família: Giulio Cesar, Camila Vieira, Thaís Souza, Thaissa Souza, Stefanie Pelizzaro, Felipe Padilha e Felipe Almeida, pelos momentos felizes que juntos passamos.

As amigas Fernanda Moura, Marília Poliana, Karine Coutinho, Renata Ferro, Aline Viana, Larisse Cotrin, Priscila Arsego, Ana Carolina, Luana de Fátima, Ana Galli, Ana Paula Schmidt e Michele Silva pelo apoio e parceria mesmo com a distância.

Aos meus alunos e colegas de profissão por todo conhecimento adquirido e por ter auxiliado na minha caminhada profissional e pessoal.

Ao meu fiel companheiro Lucky, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

À Deus pela vida, sabedoria, proteção, e por estar comigo em todos os momentos guiando e abençoando.

À UDESC, especialmente ao CAV e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais pela formação científica. Ao CNPQ e FAPESC pelos recursos financeiros.

“Para achar a solução,  
continue a nadar.”

- Dory

## RESUMO

**FIGUEIREDO, Agna Letícia Botelho. MOVIMENTO DE FÓSFORO POR MEIO DE ENXURRADA DA EROSÃO HÍDRICA: POSSÍVEIS EFEITOS AMBIENTAIS.** 2021. ... f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambientais) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, SC. 2022.

A erosão hídrica representa um forte risco ambiental devido a problemas como o movimento de fósforo (P) através da água e dos sedimentos na erosão hídrica. A erosão hídrica é influenciada pela chuva, solo, relevo, cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas e, por isso, causa degradação do solo. O manejo inadequado e a falta de vegetação do solo causa arraste de grande quantidade de sedimentos e nutrientes decorrentes de erosão, podendo contaminar águas de superfície e causar dano ambiental, principalmente devido ao efeito do P. Diante disto, com este trabalho objetivou-se quantificar o movimento de P por meio de erosão hídrica ao longo do declive do terreno. A pesquisa foi realizada em um Cambissolo Húmico alumínico léptico, em escala de parcela, por meio de chuva simulada. Antes de instalar os tratamentos removeu-se totalmente os resíduos culturais remanescentes da parte aérea das culturas antecessoras. A superfície do solo restou quase totalmente descoberta e com rugosidade mínima. Sobre essa condição, os tratamentos, com duas repetições, diferenciados pela dose de fertilizante superfosfato triplo (SFT) foram aplicados na superfície do solo: (i) 0 (zero) kg ha<sup>-1</sup>; (ii) 200 kg ha<sup>-1</sup>; (iii) 400 kg ha<sup>-1</sup>; e (iv) 800 kg ha<sup>-1</sup>. O fertilizante foi aplicado em dose única sobre o solo. Imediatamente após a aplicação do SFT, foi aplicada uma chuva simulada em cada tratamento. Na sequência, mais três chuvas foram aplicadas em intervalos de aproximadamente 20 dias uma das outras. Cada chuva teve a duração de 45 minutos, com intensidade constante planejada de 80 mm h<sup>-1</sup>. Durante a chuva, foi quantificada a taxa de enxurrada e coletadas amostras para determinar as perdas totais de água e sedimentos. Em amostras de enxurrada coletadas durante o escoamento, foi determinado o teor de P solúvel na água. O P foi determinado em amostras coletadas na superfície do solo antes de cada chuva, no intervalo entre elas e no final da última chuva. As amostras do solo foram coletadas, uma, na extremidade superior de cada parcela e, outra, na extremidade inferior. Relações foram feitas entre os dados visando calcular a taxa de enriquecimento e inferir sobre os possíveis impactos ambientais dessas perdas por erosão. O teor de P no solo aumenta com o aumento da dose de SFT aplicado, aumentando o transporte do elemento pela erosão hídrica em solo sem cultivo e descoberto. O transporte do P pela erosão hídrica é seletivo de acordo com o diâmetro dos sedimentos; o teor do elemento é maior nos sedimentos de menor diâmetro do que nos maiores, e é expressivamente alto naqueles com diâmetro < 0,038 mm. O teor de P encontrado nos diversos diâmetros de sedimentos é 1,289 vezes maior do que o teor no solo, significando alto potencial de enriquecimento (28,9%); isso pode gerar eutrofização se os sedimentos depositarem em corpos d'água; esse fenômeno aumenta com a diminuição de diâmetro dos sedimentos. O teor de P na água de enxurrada é baixo comparado ao teor nos sedimentos e no solo; na condição sem aplicação fertilizante, o teor na água equivale a 5% do teor nos sedimentos de erosão e em relação à superfície do solo a equivalência é de 3%. O potencial de perda de P por erosão hídrica diminui com o aumento do período que separa o momento de aplicação do adubo no solo e o de ocorrência da chuva, em solo sem cultivo e descoberto; na primeira chuva após a aplicação do adubo, em especial, a perda de P é expressivamente maior no início da enxurrada em relação aos momentos subsequentes.

**Palavras-chave:** erosão do solo, solo descoberto, arraste de fósforo, taxa de enriquecimento.

## **ABSTRACT: PHOSPHORUS MOVEMENT THROUGH WATER EROSION FLOOD: POSSIBLE ENVIRONMENTAL EFFECTS**

Water erosion poses a strong environmental risk due to problems such as the movement of phosphorus (P) through water and sediments in water erosion. Water erosion is influenced by rainfall, soil, relief, soil cover and management, and conservation practices and, therefore, causes soil degradation. Inadequate management and lack of soil vegetation cause a large amount of sediments and nutrients to be dragged from erosion, which can contaminate surface waters and cause environmental damage, mainly due to the effect of P. Therefore, this work aimed to quantify the movement of P through water erosion along the slope of the land. The research was carried out in a Inceptisol soil, at plot scale, through simulated rainfall. Before installing the treatments, the remaining crop residues of the aerial part of the predecessor cultures were completely removed. The soil surface remained almost completely uncovered and with minimal roughness. Under this condition, the treatments, with two replications, differentiated by the dose of triple superphosphate fertilizer (TSP) were applied to the soil surface: (i) 0 (zero) kg ha<sup>-1</sup>; (ii) 200 kg ha<sup>-1</sup>; (iii) 400 kg ha<sup>-1</sup>; and (iv) 800 kg ha<sup>-1</sup>. The fertilizer was applied in a single dose on the soil. Immediately after the application of the TSP, a simulated rainfall was applied to each treatment. Subsequently, three more rains were applied at intervals of approximately 20 days from each other. Each rain lasted 45 minutes, with a planned constant intensity of 80 mm h<sup>-1</sup>. During the rain, the runoff rate was quantified and samples were collected to determine the total losses of water and sediment. In runoff samples collected during runoff, the water-soluble P content was determined. P was determined in samples collected on the soil surface before each rain, in the interval between them and at the end of the last rain. Soil samples were collected, one at the upper end of each plot and the other at the lower end. Relationships were made between the data in order to calculate the enrichment rate and infer about the possible environmental impacts of these erosion losses. The P content in the soil increases with the increase of the dose of TSP applied, increasing the transport of the element by water erosion in uncultivated and uncovered soil. The transport of P by water erosion is selective according to the diameter of the sediments; the element content is higher in sediments of smaller diameter than in larger ones, and is significantly higher in those with diameter < 0.038 mm. The P content found in the different diameters of sediments is 1.289 times greater than the content in the soil, meaning a high potential for enrichment (28.9%); this can generate eutrophication if sediments settle in water bodies; this phenomenon increases with decreasing sediment diameter. The P content in runoff water is low compared to the content in sediments and soil; in the condition without fertilizer application, the content in the water is equivalent to 5% of the content in the erosion sediments and in relation to the soil surface, the equivalence is 3%. The potential for loss of P by water erosion decreases with the increase of the period that separates the time of application of the fertilizer in the soil and that of the occurrence of rain, in uncultivated and uncovered soil; in the first rain after fertilizer application, in particular, the loss of P is significantly higher at the beginning of the runoff in relation to the subsequent moments.

**Keywords:** soil erosion, bare soil, phosphorus carryover, enrichment rate.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura. 1: Parcela descoberta e sem cultivo recém-instalada no experimento.....	27
Figura. 2 Esquema demonstrativo da distribuição espacial das parcelas, com indicação dos tratamentos, na área experimental.....	27
Figura 3. Simulador de chuva tipo empuxo em operação na pesquisa.....	28
Figura 4. Parcela coberta com lona plástica recém-instalada no experimento.....	29
Figura 5. Relação entre o teor de P na camada de 0,025 m de superfície do solo e o momento (numérico: 2, 3, 4, 5 e 6) de coleta da amostra do solo ao longo do período da pesquisa. 2: imediatamente após a adubação; 3: entre a 1 <sup>a</sup> e a 2 <sup>a</sup> chuva; 4: entre a 2 <sup>a</sup> e a 3 <sup>a</sup> chuva; 5: entre a 3 <sup>a</sup> e a 4 <sup>a</sup> chuva; e 6: imediatamente após a 4 <sup>a</sup> chuva. (Média das repetições, tratamentos e posições - superior e inferior - na parcela). .....	47
Figura 6. Relação entre o teor de P nos sedimentos e a classe de diâmetro dos sedimentos < 0,038 mm, média entre as classes 0,038 e 0,125 mm, 0,125 e 0,250 mm, 0,250 e 0,500 mm, 0,500 e 1,000 mm e entre as classes 1,000 e 2,000 mm e a classe de diâmetro dos sedimentos > 2,000 mm. (Média das repetições e tratamentos).....	48
Figura 7. Teor de fósforo nos sedimentos por diâmetro sedimentos e por tratamento: < 0,038 mm, média entre as classes 0,038 e 0,125 mm, 0,125 e 0,250 mm, 0,250 e 0,500 mm, 0,500 e 1,000 mm e entre as classes 1,000 e 2,000 mm e a classe de diâmetro dos sedimentos > 2,000 mm, nos quatro tratamentos de dose de superfosfato triplo (SFT). (Média das repetições) ...	50
Figura 8. Relação entre o teor de P nos sedimentos e o teor de P no solo na camada de 0-0,025 m (Média das repetições e tratamentos). .....	52
Figura 9. Relação entre o teor de P na água e o teor de P nos sedimentos de erosão. (Média das repetições e tratamentos).....	53
Figura 10. Teor de P na água de enxurrada em diversos momentos ao longo do tempo de duração do escoamento superficial, nos quatro tratamentos de dose superfosfato triplo (SFT). Amostras de 1 a 5: 1 <sup>a</sup> chuva. Amostras de 6 a 10: 2 <sup>a</sup> chuva. Amostras de 11 a 15: 3 <sup>a</sup> chuva. Amostras de 16 a 20: 4 <sup>a</sup> chuva. (Média das repetições).....	54
Figura 11. Relação entre a perda acumulada de solo e a altura acumulada de chuva ao longo do tempo de aplicação dos quatro testes de chuva simulada. (Média dos tratamentos).....	55
Figura 12. Relação entre a perda acumulada de água e a altura acumulada de chuva ao longo do tempo de aplicação dos quatro testes de chuva simulada. (Média dos tratamentos).....	56
Figura 13. Relação entre a perda acumulada de solo e a perda acumulada de água por escoamento superficial ao longo do tempo de aplicação dos quatro testes de chuva simulada. (Média dos tratamentos).....	58

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Intensidade observada das chuvas simuladas aplicadas em cada repetição (R) dos diversos tratamentos de dose (D) de superfosfato triplo (SFT), em chuvas com duração de 45 minutos cada uma.....	36
Tabela 2: Fósforo na camada de 0-0,025 m do solo, em cada tratamento (T) de dose do superfosfato triplo (SFT), na posição (P) superior (S) e inferior (I) da parcela, em cada uma das coletas de amostras do solo (média das repetições) .....	37
Tabela 3: Teor de fósforo por diâmetro de sedimentos transportados pela enxurrada e retidos na malha das peneiras (média das repetições e das chuvas), e na água de enxurrada (média das repetições), em cada tratamento de dose de SFT.....	40
Tabela 4: Declividade do terreno e perdas de solo e água, em cada repetição (R) e na média dos tratamentos (Trat) de dose (D) do superfosfato triplo (SFT). .....	44
Tabela 5: Perdas totais de fósforo nos sedimentos de erosão (PSe) em cada tratamento (Trat) (média das repetições, testes de chuva e diâmetros dos sedimentos) e perdas de fósforo na água de enxurrada nos tratamentos e testes de chuva (T) (média das repetições) .....	46

## **Sumário**

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14

2.1. USO DA TERRA E MANEJO DO SOLO .....	14
2.2. EROSÃO DO SOLO.....	17
2.2.1. Erosão hídrica pluvial do solo e fatores envolvidos.....	19
2.2.2.1. Perdas de fósforo por erosão hídrica .....	22
3. HIPÓTESES.....	23
4. OBJETIVOS .....	23
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
5.1. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	24
5.1.1. Clima, solo, local e natureza da pesquisa.....	24
5.1.2. Unidade experimental, sistema coletor de enxurrada e relevo do local.....	25
5.1.3. Histórico de manejo do solo na área experimental onde a pesquisa foi realizada .....	25
5.1.4. Sistematização do terreno, tratamentos e delineamento experimental dos tratamentos.....	26
5.1.5. Simulador de chuva e chuvas simuladas aplicadas .....	28
5.2. COLETA DE AMOSTRAS DO SOLO E QUANTIFICAÇÃO DA EROSÃO .....	29
5.2.1. Amostras do solo .....	29
5.2.2. Amostras de enxurrada para cálculo das perdas de solo e água .....	30
5.2.3. Velocidade da enxurrada .....	30
5.2.4. Índice $D_{50}$ dos sedimentos transportados na enxurrada.....	30
5.2.5. Volume e intensidade de chuva .....	31
5.2.6. Recepção e processamento das amostras no laboratório.....	31
5.2.7. Cálculo da intensidade, volume e erosividade das chuvas aplicadas .....	32
5.2.8. Cálculos e ajustes realizados para as perdas de solo e água.....	33
5.2.9. Amostras de enxurrada para análise química.....	35
5.3. DETERMINAÇÕES EM LABORATÓRIO .....	35
5.4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO ESTATÍSTICO .....	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
6.1. Intensidade e volume das chuvas.....	36
6.2. Fósforo no solo.....	37
6.3. Fósforo nos sedimentos e água de enxurrada.....	39
6.4. Perdas totais de solo e água e de P nos sedimentos e água de enxurrada .....	42
6.5. Relação entre variáveis .....	46
6. CONCLUSÕES.....	58
7. REFERÊNCIAS .....	59

## **1. INTRODUÇÃO**

O avanço da agricultura nas últimas décadas e a modernização das técnicas agrícolas têm exigido cada vez mais o uso da terra e manejo do solo mais intenso. Isso fez com que esse recurso se tornasse degradado na maioria das lavouras. Vários fatores concorreram para isso, como erosão hídrica, em grande parte dos casos, a qual foi facilitada pelo relevo e pelas características pluviométricas. Este tem sido um dos principais fatores de contaminação do ambiente no entorno das áreas agrícolas, especialmente para o meio aquático.

Nesses eventos de erosão normalmente ocorrem perdas de sedimentos minerais, principalmente argila, água, matéria orgânica (MO) e nutrientes de plantas, como por exemplo o fósforo (P). O fósforo é conhecido como o principal elemento gatilho nos eventos de floração de algas nos corpos d'água. Assim, o fósforo removido pela erosão, especialmente, se constitui num dos principais fatores responsáveis pela contaminação ambiental de origem agrícola. Este aspecto negativo da erosão hídrica, em especial o seu potencial de contaminação ambiental, justificam a implantação e condução de pesquisas de erosão hídrica pluvial em todo o Brasil, visando inferir sobre os riscos ambientais.

A contenção da erosão hídrica, diversas vezes, é realizada por práticas mecânicas de conservação do solo. Muitas vezes essas práticas são vistas como mal direcionadas em relação a sua real necessidade, devido ao desconhecimento das condições físicas do solo que influenciam no desenvolvimento desses processos. Isto é consequência, também, da falta de dados sobre o comportamento do solo diante de ação da chuva, causador ativo da erosão hídrica, cuja erosividade também é pouco conhecida. As tentativas de controle da erosão são feitas, desse modo, superdimensionando as estruturas para seu controle, o que encarece os custos de produção, ou as subdimensionando, o que não controla adequadamente a erosão hídrica e acarretando aumento dos custos de produção.

Em decorrência disso, os problemas de assoreamento e contaminação das águas superficiais por produtos da erosão continuam ocorrendo. Assim, é importante levar em consideração a legislação para controle de P em ambientes aquáticos, quando for aplicar fertilizante fosfatado ao solo. Pois, com o planejamento devido para a dose máxima a ser aplicada, é possível minimizar as perdas de fósforo na água e nos sedimentos da erosão hídrica. Este estudo visa diminuir o impacto ambiental dessas perdas e, por isso, justificou a implantação e condução desta pesquisa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. USO DA TERRA E MANEJO DO SOLO**

#### **2.1.1. Uso da terra**

O uso da terra refere-se a forma como cada porção da superfície terrestre é usada (NORTON, 1939). Normalmente, a superfície terrestre é usada com floresta nativa, floresta cultivada, campo nativo, pastagem cultivada, culturas anuais de grãos e cereais e outras espécies destinadas à alimentação, culturas semi-perene ou perene de frutíferas e outras espécies, com recreação e preservação da fauna e flora silvestre, com edificações, descarte de rejeitos, armazenagem de água e mobilidade. Dentre as áreas destinadas à mobilidade, as rodovias não pavimentadas, comuns nas áreas rurais são uma importante forma de uso da terra.

#### **2.1.2. Manejo do solo**

O manejo do solo refere-se ao conjunto de operações realizadas no solo para viabilizar a produção e/ou o aproveitamento do solo para qualquer fim, em cada uma das formas de uso da terra recém descritas (Bertol et al., 2019). Um dos propósitos do preparo do solo é criar um ambiente favorável para o crescimento das raízes (NEUWALD, 2005). As operações necessárias e destinadas ao uso de áreas agro-silvo-pastoris são o preparo mecânico, a adubação e correção química/orgânica, a semeadura/plantio, os tratos culturais, a colheita, o manejo dos resíduos culturais e as práticas conservacionista. O preparo do solo realizado normalmente com uma operação de arado e duas de grade, denominado preparo convencional (PC). Esse tipo de manejo do solo é muito usado no Brasil, dependendo do tipo de cultura a ser cultivada. Antagônico ao PC, a semeadura e plantio de culturas com nenhuma operação de preparo prévio do solo, denominado semeadura direta (sementes - SD) e plantio (mudas PD), é um sistema de manejo de solo muito usado. O cultivo mínimo (CM) e o preparo reduzido (PR) são dois sistemas de manejo do solo em que o preparo mecânico é realizado com intensidade intermediária entre o PC e a SD/PD. Esses dois sistemas de manejo do solo são pouco usados no Brasil atualmente. Normalmente o preparo é realizado com operações de escarificador ou de subsolador combinadas ou não com uma operação de grade.

### **2.1.2.1. Preparo convencional**

O preparo convencional de solo pode ser realizado de várias maneiras. O tradicional é realizar primeiramente uma operação com arado e secundariamente duas operações de grade (Bertol et al., 2019). No entanto, é possível combinar mais de uma operação de arado com mais de duas operações de grade. Também, é possível realizar esse preparo com operações primárias de grade aradora e secundárias de grades niveladoras, ou, com apenas uma operação de enxada rotativa. Assim, esses preparamos convencionais podem ser considerados não conservacionistas de solo, porque não satisfazem o aspecto da “zona entre as fileiras”. Esses preparamos não mantêm os resíduos culturais na superfície do solo, em geral produzem baixa rugosidade superficial. Também, criam condições ótimas para a ocorrência do selamento superficial, favorecendo a erosão hídrica. Abaixo da superfície do solo, por outro lado, esses preparamos podem criar condições relativamente favoráveis às raízes das plantas na “zona das fileiras das culturas”, já que aumentam o volume de macroporos e favorecem a circulação de água, ar e calor dentro da camada preparada. Abaixo dessa camada, normalmente ocorre compactação do solo que diminui a infiltração de água.

### **2.1.2.2. Semeadura direta e plantio direto**

Na semeadura direta e no plantio direto cria-se no solo condições mais favoráveis do que os preparamos convencionais na “zona das entrelinhas” (Bertol et al., 2019). Nessa zona preserva-se todo o resíduo cultural na superfície do solo. Com o passar do tempo, no entanto, diminui o volume de macroporos, nos 6 a 8 cm superficiais e diminui a rugosidade superficial. Ao mesmo tempo ocorre aumento da densidade. Isto cria problemas do ponto de vista de manejo da água na superfície do solo. Diminui muito a infiltração de água no solo e aumenta substancialmente o escoamento superficial. Abaixo da superfície (abaixo dos 6 a 8 cm superficiais), no solo da semeadura direta em geral são preservadas as propriedades físicas. Isso é favorável ao bom desenvolvimento das raízes das plantas e crescimento das culturas. No entanto, como há uma tendência de concentração de nutrientes nos primeiros 6 a 8 cm da superfície nesse sistema de manejo do solo, as raízes das culturas tendem também a concentrarem-se nessa camada. As raízes podem enfrentar, nesse caso, problemas em relação à circulação de água, ar e calor. É importante salientar que a semeadura direta é conduzida no Brasil de diversas formas. Essas formas variam quanto à capacidade desse sistema de realmente promover a conservação do solo

e da água. Para que esse sistema de manejo do solo efetivamente seja conservacionista, é necessário que a superfície do solo seja mantida permanentemente e completamente cobertura e que a rugosidade superficial seja no mínimo média. Além disso, a densidade deve ser baixa e a porosidade, especialmente a macroporosidade, deve ser alta. Na maioria das situações, no entanto, essas condições não estão presentes nas lavouras e não satisfazem o critério conservacionista de solo.

Outro aspecto de grande variação quanto a forma de manejo de sistema de cultivo no Brasil é a forma de aplicação de fertilizantes, podendo ser na superfície ou parcialmente incorporados no solo. A condição menos conservacionista de solo da semeadura direta é quando o solo se encontra praticamente sem cobertura superficial de resíduos culturais, ausência de rugosidade superficial e elevada compactação com baixíssima porosidade interna.

A consolidação do sistema de semeadura direta propiciou grande desenvolvimento tecnológico para a agricultura e se refletiu em aumento significativo da produtividade das lavouras de grãos. (NEUWALD, 2005)

#### **2.1.2.3. Cultivo mínimo e preparo reduzido**

O cultivo mínimo e preparo reduzido é considerado um sistema de manejo conservacionista de solo. Este sistema é definido como o preparo que mantém uma quantidade de resíduos culturais na superfície, que, conjuntamente com a rugosidade superficial criada pelo preparo mecânico, controla a erosão hídrica. Esse controle da erosão deve ser tal que as perdas de solo sejam em níveis inferiores ou, no máximo, iguais à tolerância de perda de solo. Assim, esse sistema de manejo pode manter indefinidamente a capacidade produtiva do solo. Normalmente, esse preparo conservacionista do solo é executado com a combinação de uma operação de escarificador seguida de uma operação de grade, ou uma operação de grade seguida de uma operação de escarificador. Portanto, esse tipo de preparo efetivamente cria no solo condições favoráveis ao controle da erosão hídrica e, ao mesmo tempo, condições que maximiza o potencial produtivo das culturas.

#### **2.1.2.4. Estradas rurais não pavimentadas**

As estradas rurais no Brasil, foram abertas pelos colonizadores sem qualquer planejamento, pois eles se orientaram, basicamente, pela estrutura fundiária e pelas facilidades do terreno o que, em períodos de chuvas intensas, favoreceu o desenvolvimento de processos erosivos extremamente prejudiciais à pista de rolamento, às áreas marginais, e à sua plataforma como um todo (Demarchi, et al. 2003). Atualmente, o leito das estradas deve apresentar características adequadas para suportar a carga a que será submetido, sem que ocorram deformações que comprometam o projeto e o traçado originais (CASARIN, 2008).

As estradas rurais não pavimentadas, por um lado são fundamentais porque são necessárias à circulação de produtos agro-silvo-pastoris destinados aos mercados consumidores. Por outro lado, tornam-se um grande problema do ponto de vista da conservação do solo e da água e do ambiente no seu entorno, devido à erosão hídrica (Decoregio et al., 2019).

O solo no leito das estradas não pavimentadas apresenta ausência de qualquer tipo de cobertura, rugosidade muito baixa, densidade alta e porosidade praticamente ausente. No caso dessas estradas, especialmente as rurais, o manejo do solo é realizado por um conjunto de operações mecânicas necessárias à sua construção e conservação. Essas estradas são construídas com grande movimentação de terra, incluindo cortes e aterros.

Ao longo do tempo o solo é mantido permanentemente descoberto e em geral não são aplicadas práticas de conservação do solo para reduzir a erosão. Assim, as perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica em geral são muito elevadas. Portanto, é necessário determinar essas perdas para propor medidas de controle da erosão nesse ambiente.

O estudo da erosão hídrica em condição de solo descoberto, sem cultivo, semelhante ao de uma estrada rural não pavimentada, idealmente deve ser realizado em escala de parcela. Nessa escala é possível controlar adequadamente os fatores envolvidos na erosão, de modo, a produzir valores minimamente confiáveis das perdas de solo, água e nutrientes pela erosão. O presente trabalho foi realizado em um solo com esse tipo de manejo, visando contribuir com dados que possam servir ao manejo adequado dessas estradas.

## 2.2. EROSÃO DO SOLO

A erosão do solo fez decair as primeiras civilizações humanas e alguns impérios na antiguidade, devido à extensiva exploração agrícola de terras naturalmente férteis. Alguns desertos antigos e outros recentes formaram-se em decorrência da erosão do solo. O Império Romano, por exemplo, decaiu basicamente devido a degradação química e erosão do solo. O

termo erosão, simploriamente significa desgaste. Assim, a erosão do solo a priori pode ser definida como o desgaste do solo, no entanto, sua plena compreensão a abordagem de aspectos básicos envolvidos (BENNET, 1939).

Os agentes naturais, diretos, causadores da erosão do solo são a água e o vento. A água é o agente simples de erosão mais importante, independentemente da forma como ela se apresenta. Basta que se movimente. O vento é outro importante agente simples de erosão. O vento não tem capacidade de desgastar o solo, porém, a abrasão que resulta da ação dos grânulos carregados em suspensão pelo vento acarreta a erosão. Além da água e do vento, agentes naturais, indiretos, como mudanças de temperatura, atividade biológica e gelo, contribuem para a erosão do solo.

A erosão pode ser hídrica, causada pela água; eólica, causada pelo vento; e glacial, causada pelo degelo. A erosão hídrica pode ser pluvial, causada pela água das chuvas; fluvial, causada pela água dos rios; lacustre, causada pela água dos lagos; e marinha, causada pela água dos mares.

A erosão natural é causada pelos agentes erosivos durante longo tempo, sem a interferência do homem, em seu meio natural. A erosão induzida é causada pelos agentes erosivos durante curtos espaços de tempo, com a interferência do homem.

A erosão é o resultado de um trabalho, quando um agente (vento ou água) dotado de energia, em movimento exerce uma força que encontra uma resistência (solo), podendo produzir movimento em corpos (partículas de solo), resultando em um trabalho.

Geralmente, a erosão superficial das terras agrícolas é causada pela energia cinética da água em movimento, enquanto os movimentos de massa são geralmente causados pela energia potencial resultante da posição da massa de solo acima de um ponto para o qual ela pode deslizar ou cair.

A erosão sempre se processa em três fases, às vezes nem sempre muito distintas uma das outras, pois elas podem realizar-se concomitantemente, a desagregação, o transporte e a deposição. A desagregação consiste no desprendimento ou ruptura dos grânulos de rocha ou dos sedimentos e micro agregados da massa de solo que os contém. É a primeira e mais importante fase do processo erosivo, pois, se não houver a desagregação inicial das partículas dificilmente haverá transporte e deposição. O transporte consiste na remoção das partículas desagregadas para algum lugar fora do ponto de origem. É a segunda fase do processo erosivo, pois, após as partículas terem sido desagregadas pelos agentes erosivos, estes mesmos agentes as

transportam. A deposição consiste na parada do material desagregado e transportado, em algum ponto sobre a superfície da terra. É a terceira e última fase do processo erosivo.

Uma vez abordados os aspectos fundamentais sobre o processo de erosão, pode-se definir a erosão do solo em termos específicos como “um processo de desagregação, transporte e deposição das partículas de solo causado pelos agentes erosivos água e vento, fortemente influenciado pelas atividades do homem”. É o desgaste induzido das terras agrícolas, com a remoção de solo do seu local original.

### **2.2.1. Erosão hídrica pluvial do solo e fatores envolvidos**

A intensificação do manejo do solo nos últimos anos têm sido a principal causa do aumento da erosão hídrica, sobretudo em condição de atividade agrícola. Contribui para isso a gestão inadequada do solo (Vanwallegem et al., 2017). A erosão hídrica é denominada pluvial quando causada pela chuva; fluvial, causada pela água dos rios; lacustre pela água dos lagos; e marinha quando causada pela água dos mares (BENNET, 1939).

Os fatores que influenciam a erosão hídrica pluvial são a chuva, o solo, o relevo, a cobertura e manejo do solo e as práticas conservacionistas (WISCHMEIER & SMITH, 1978; HUDSON, 1981). Na erosão hídrica pluvial, a chuva na erosão por meio do impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo e do escoamento superficial combinado com o impacto de gotas. A frequência das chuvas influencia o processo erosivo. Com intervalos curtos entre chuvas a umidade do solo mantém-se elevada e, com isso, diminui a infiltração de água no solo e aumenta o escoamento superficial e a erosão hídrica. Em condição de solo seco decorrente de longos intervalos de tempo sem chuva, por outro lado, a umidade do solo torna-se baixa, a infiltração elevada e diminui a erosão hídrica. Independentemente disso, chuvas de alto volume combinado com elevada intensidade e frequência resultam em elevada erosão hídrica (Santos et al., 2010).

O efeito da chuva é expresso por sua erosividade, o efeito do solo é expresso por sua erodibilidade, o efeito do relevo expresso pela declividade e comprimento do declive, o efeito da cobertura e manejo do solo é expresso pela cobertura ocasionada pela das plantas e resíduos culturais e pelo preparo mecânico do solo, e as práticas conservacionistas de suporte são expressas pelo cultivo em contorno, rotação de culturas em faixas e em contorno e terraceamento (HUDSON, 1981). Dentre esses fatores, a cobertura e manejo do solo é o fator

mais importante, enquanto, os fatores fundamentais são a erosividade e a erodibilidade (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

Á medida em que aumenta a densidade superficial do solo este torna-se mais susceptível a erosão hídrica. Isso se deve ao declínio da infiltração de água no solo e aumento do escoamento superficial e da erosão hídrica (PANACHUKI, 2003). Enquanto essa condição perdurar a erosão continuará elevada (VALENTIN, 2018).

A perda de argila (Bertol et al., 2014) e de espécies químicas (Bertol et al., 2007; Mirás Avalos et al., 2009; Gebler et al., 2011) por erosão hídrica é um dos principais fatores responsáveis pela contaminação ambiental, especialmente das águas de superfície. A perda de espécies químicas por erosão pode ser expressa como teor do elemento na água e nos sedimentos em suspensão e como a quantidade total perdida. O teor de um elemento químico na enxurrada varia principalmente com seu teor no solo, o qual é influenciado pelas fertilizações, manejo e tipo de solo. A quantidade total transportada, no entanto, depende tanto do teor do elemento no material erodido quanto do volume desse material perdido por erosão (Schick et al., 2000).

A massa de sedimentos carregados pela enxurrada depende da energia de transporte da enxurrada e da condição em que se encontra a superfície do solo. A inadequada cobertura do solo contribui para elevar a desagregação e transporte de sedimentos, podendo comprometer a qualidade da água e o empobrecimento do solo (ANDERSON & LOCKABY, 2011, Brown, et al. 2013; Brown, et al. 2018;).

A capacidade do solo de suportar a erosão provocada pela água da chuva e do escoamento superficial, por sua vez, também é definida por muitas condições, mas, especialmente, pelas características que determinam sua erodibilidade. A erodibilidade do solo relaciona-se a sua suscetibilidade ou vulnerabilidade à erosão, sendo, pois, a recíproca da sua resistência à erosão. Ela é fruto da relação de propriedades químicas, físicas, mineralógicos e biológicos do solo. O arranjo das partículas do solo, a quantidade de matéria orgânica, a estrutura e a permeabilidade são as propriedades físicas do solo que mais se relacionam com sua erodibilidade (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

A erosão hídrica pluvial nas terras agrícolas pode ocorrer na superfície do solo de duas formas, quanto ao tipo de erosão (ELLISON, 1947). A erosão entre sulcos ocorre de laminar, espalhada mais ou menos uniformemente na superfície. Essa forma de erosão ocorre em superfícies de solo descoberto e é difícil de ser visualizada, percebida. É influenciada principalmente pelo impacto de gotas das chuvas e o solo sofre principalmente a fase de desagregação de suas partículas. A erosão em sulcos ocorre dentro dos sulcos onde o escoamento superficial está

presente concentradamente. Essa forma de erosão pode ocorrer tanto em solo descoberto quanto em superfície coberta, com resíduos ou plantas, com predominância na primeira condição, sendo facilmente visualizada no campo. É influenciada principalmente pelo escoamento superficial concentrado e o solo sofre principalmente a fase de transporte de suas partículas desagregadas.

Em outras condições de uso da terra a erosão pode ocorrer nas formas de erosão em voçoroca e erosão no leito de curso d'água, podendo também ocorrer deslizamento ou movimento de massa (BENNET, 1939).

### **2.2.2. Perdas de nutrientes por erosão hídrica e fatores envolvidos**

A aplicação de adubos e corretivos químicos no solo aumenta a concentração de nutrientes na camada superficial (Cassol et al., 2002; Hart et al., 2004). Isto aumenta o teor de nutrientes na enxurrada (Schick et al., 2000; Bertol et al., 2007). A enxurrada da erosão transporta principalmente a fração argila em detrimento do silte e areia, devido à seleção das frações granulométricas do solo durante a remoção pela erosão hídrica (Langdale et al., 1985). Isso acontece porque a erosão do solo é um fenômeno de superfície.

O teor de nutrientes na enxurrada em geral é alto na erosão oriunda de áreas manejadas sem preparo mecânico e adubadas (Barbosa et al., 2009; Engel et al., 2009; Miras Avalos et al., 2009). Isso se deve ao transporte da camada de solo superficial, a qual é mais rica em nutrientes e compostos orgânicos. Isto é influenciado também pela ausência de preparo de solo nesse sistema de manejo, especialmente para o caso de nutrientes. Esse fenômeno se deve também ao próprio processo de formação de solo para o caso dos compostos orgânicos. Com isso, nessas circunstâncias a erosão se caracteriza por constituir-se predominantemente de sedimentos minerais e orgânicos de natureza coloidal, os quais têm alta capacidade de adsorção de alguns elementos químicos, como o fósforo por exemplo (Hart et al., 2004). Assim, os sedimentos transportados pela enxurrada nesses sistemas de manejo podem apresentar maior teor de nutrientes (Schick et al., 2000) e de argila (Langdale et al., 1985) do que o solo de onde foram removidos os sedimentos. Isto tem sido atribuído à textura do material transportado pela enxurrada, o qual é mais rico em argila do que o solo de onde foi removido (Schaefer et al., 2002). Esse fenômeno ocorre porque a fração fina do solo é mais facilmente transportada pela erosão hídrica do que a fração grosseira predominantemente composta de silte e areia (Langdale et al., 1985). Essa diferença de teor de nutrientes, em especial de P, entre o material de erosão

e o solo de onde a mesma se originou, caracteriza uma taxa de enriquecimento, conforme verificado por Schick et al. (2000), Martins Filho et al. (2009). A taxa de enriquecimento pode indicar a possível ocorrência de eutrofização de águas de superfície.

O acúmulo dos nutrientes no solo é dependente das características mineralógicas, da riqueza do solo em matéria orgânica, da quantidade e forma de aplicação de adubos no solo e da cobertura superficial e manejo do solo (MELLO, 2002). A água de enxurrada pode conter valores relevantes de nutrientes que fazem parte de fertilizantes agrícolas. Isso ocorre porque os adubos são aplicados em superfície ou próximo dela no momento de semeadura ou plantio, especialmente quando se trata de lavouras sob manejo semeadura direta ou plantio direto (Lacerda et al., 2015). O teor de um elemento químico na água da enxurrada é dependente especialmente da concentração desse elemento no solo. Isso tem dependência também com o tipo de solo, adubação e tipo de manejo aplicado ao solo (GUADAGNIN, 2003). A concentração de nutrientes nos sedimentos erodidos sempre é maior do que a concentração na água de enxurrada (Barbosa et al., 2009; Barbosa et al., 2021).

#### **2.2.2.1. Perdas de fósforo por erosão hídrica**

O Fósforo (P) é um elemento químico que apresenta baixa solubilidade em água e lento movimento no solo, o que facilita sua concentração na superfície do solo, principalmente em sistemas de manejo com ausência ou fraca mobilização mecânica (Roberts et al., 2017). Devido a esses fatores, ele apresenta alta susceptibilidade ao transporte por escoamento em situação de erosão hídrica (Sharpley et al., 1987).

O P desencadeia a eutrofização das águas (Sharpley et al., 1987). Assim, evitar que ele seja depositado em mananciais por meio da erosão hídrica é de fundamental importância para minimizar esse problema. Apesar de pouco solúvel na água, este elemento é fortemente adsorvido aos sedimentos, podendo eutrofizar as águas se os sedimentos nela depositarem (Sharpley et al., 1987; McIsaac et al., 1995). Felizmente, apenas parte do P ligado aos sedimentos presentes na enxurrada é biodisponível (Sharpley et al., 1987), tornando-se solúvel. Vollenweider (1971) propôs o valor de  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$  como sendo o teor crítico de P solúvel na água. Assim, ao exceder tal teor na água, o P poderá eutrofizar mananciais de lagos e outros reservatórios.

O teor de P no solo e na água de escoamento depende em grande parte do manejo do solo. Em sistemas de manejo em que a aplicação de fertilizantes é realizada na superfície, ocorre acúmulo

de P na camada dos primeiros centímetros de superfície, devido a principalmente a ciclagem dos resíduos culturais (SÁ, 1993). O teor de P na superfície é maior no método de semeadura direta em relação ao cultivo convencional. Por outro lado, as perdas totais desse elemento por meio de erosão apresentam valores mais altos em lavoura sob manejo convencional (Bandeira et al., 2019).

Diversos fatores influenciam a concentração de P no solo, como a matéria orgânica, a mineralogia, a umidade e o teor do elemento natural no solo. Além disso, quanto mais argila, óxido de ferro e alumínio contiver o solo, maior será a fixação de P (SANTOS, 2019). O teor do elemento na água da enxurrada depende em particular da sua concentração no solo, relacionada ao tipo de adubação, e do manejo e solo (Guadagnin et al., 2005).

Nos estudos referentes ao P presente no escoamento superficial o elemento está presente geralmente na forma solúvel (Ps). Esta forma pode ser classificada como P dissolvido reativo (Pdr) e P dissolvido não reativo (Pdn). Ainda, o P pode estar presente na enxurrada na particulada que compreende todas as formas de P adsorvidas ou complexadas às frações orgânicas e minerais sólidas presentes na enxurrada. Essa fração compõe entre 60 e 90% do P total presente na enxurrada em áreas de cultivo agrícola (Howarth et al. 1995; SHARPLEY, 1995). Para uma plena análise ambiental dos efeitos das diversas formas de P no solo é preciso quantificar sua biodisponibilidade para os organismos aquáticos (SHARPLEY, 1993).

### **3. HIPÓTESES**

1. O teor e a quantidade total de fósforo na água e nos sedimentos que saem da parcela pela erosão hídrica aumentam com o aumento da dose de fertilizante fosfatado aplicado na superfície descoberta de um Cambissolo Húmico alumínico léptico.
2. O teor de fósforo presente na água e nos sedimentos de enxurrada é maior do que na superfície do solo de onde a enxurrada se originou.
3. O ambiente fora do local de origem da erosão enriquece em fósforo em relação ao ambiente onde ocorre a erosão.

### **4. OBJETIVOS**

#### **Objetivo geral**

Mensurar o arraste de fósforo pela água e pelos sedimentos de enxurrada na erosão hídrica mediante quatro diferentes doses de fertilizante fosfatado superfosfato triplo aplicado na superfície descoberta de um Cambissolo Húmico alumínico léptico.

### **Objetivos específicos**

1. Quantificar as perdas totais de água e sedimentos por erosão hídrica, e o teor e quantidade total de fósforo na água e nos sedimentos da erosão, em quatro doses de fertilizante superfosfato triplo aplicado na superfície descoberta do solo.
2. Relacionar o teor de fósforo contido nos sedimentos de enxurrada com o teor no solo de onde os sedimentos foram removidos.
3. Estabelecer a taxa de enriquecimento e inferir sobre o potencial do fósforo na contaminação do ambiente.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA EXPERIMENTAL**

#### **5.1.1. Clima, solo, local e natureza da pesquisa**

A região está situada no bioma Mata Atlântica no Sul do Brasil, num local entre as coordenadas 27° 49' latitude Sul e 50° 20' longitude, a Oeste de Greenwich, a 900 m de altitude média. O experimento está localizado no Campus do Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages, no Bairro Conta Dinheiro no município de Lages, SC.

O solo contém 318 g kg<sup>-1</sup> de argila, 203 g kg<sup>-1</sup> de areia e 479 g kg<sup>-1</sup> de silte na camada de 0-0,025 m. Nesta camada, antes do início da pesquisa o solo apresentava índice pH em água de 5,5, 12,1 mg dm<sup>-3</sup> de P, 143 mg dm<sup>-3</sup> de potássio (K) e 28,2 g kg<sup>-1</sup> de carbono orgânico (CO). A erodibilidade do solo é de 0,0175 t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> (Schick et al., 2014b).

O clima, do tipo Cfb (Wrege et al., 2011), é mesotérmico úmido de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). As chuvas da região têm volume anual médio de 1533 mm e erosividade anual média de 5033 MJ mm há<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (Schick et al., 2014a). O solo é um Cambissolo Húmico segundo Embrapa (2013), ou, Humic Distrudept segundo Soil Survey Saff (2014).

A natureza da pesquisa constituiu-se de uma primeira fase experimental em campo conduzida com chuva simulada, em escala de parcela. Em uma segunda fase, em laboratório, as amostras de enxurrada foram analisadas física e quimicamente no Laboratório de Uso e Conservação do Solo do CAV/UDESC e, na terceira fase em escritório os dados foram organizados e tratados estatisticamente para a redação da Dissertação e de artigos.

### **5.1.2. Unidade experimental, sistema coletor de enxurrada e relevo do local**

A pesquisa foi realizada sobre oito unidades experimentais, ou parcelas, cada uma com 3,5 m de largura por 11 m de comprimento no sentido paralelo ao declive. A distância entre duas parcelas será de 3,5 m, conforme recomendado por Swanson (1965). As parcelas foram delimitadas por chapas galvanizadas nas partes lateral e superior, cravadas 10 cm no solo. Na parte inferior da parcela encontrava-se instalado um sistema de calha coletora do escoamento. A calha era conectada a uma tubulação que permitia a condução do fluxo de enxurrada até uma trincheira situada seis metros abaixo, onde as amostras de enxurrada foram coletadas. O relevo no local da pesquisa foi considerado ondulado (declividade entre  $0,08$  e  $0,2\text{ m m}^{-1}$ ), com altitude em torno de 900 m. A declividade média no local das parcelas era de  $0,134\text{ m m}^{-1}$ .

### **5.1.3. Histórico de manejo do solo na área experimental onde a pesquisa foi realizada**

As pesquisas sobre erosão hídrica com a utilização de simulador de chuva nesta área experimental iniciaram em 2006. Nesse ano realizou-se a correção da acidez do solo, incorporando o calcário com duas arações e duas gradagens, conforme descrito em Barbosa et al. (2009). Anteriormente a este período a vegetação era constituída por campo nativo. A partir de então, oito parcelas foram delimitadas, sendo que em seis delas o solo foi cultivado e em duas delas o solo foi mantido sem cultivo. No primeiro trabalho, o solo foi cultivado com ervilhaca (*Vicia sativa L.*) e aveia preta (*Avena strigosa Schreb.*) e, posteriormente, com várias culturas, para sistematização do solo nas seis parcelas. As unidades experimentais, mantidas como parcelas testemunhas desde o ano de 2009 não receberam cultivo e foram conservadas livres da incidência de plantas invasoras por meio de capinas e aplicação de herbicidas. Na safra seguinte, as parcelas foram novamente usadas para fins de pesquisa. Cultivou milho (*Zea mays*), soja (*Glycine max*), feijão (*Phaseolus vulgaris*) e consórcio de milho e feijão. Na sequência o solo recebeu a cultura do trigo (*Triticum aestivum*) e posteriormente soja e milho, semeados no

sentido perpendicular ao declive. Depois disso foi realizada uma pesquisa em que o solo foi mantido sem cultivo em todas as parcelas que foram preparadas com uma escarificação apenas. Na sequência, uma nova pesquisa com chuva simulada foi realizada sobre as mesmas parcelas, tendo sido o solo cultivado com soja. A partir de então, após um intervalo de tempo de seis meses em que o solo permaneceu em pousio, nova pesquisa com chuva simulada foi iniciada sobre as mesmas parcelas, novamente sem cultivo do solo. Mais duas parcelas foram conduzidas nesse experimento, durante esse período, em que o solo permaneceu sem cultivo e sem adubação. Posteriormente, foram cultivados milho e soja, ficando seus restos culturais sobre as parcelas. A última pesquisa antes desta, ocorreu em que o solo manejado da seguinte maneira: plantio de cebola em solo sem preparo prévio, com sulcamento apenas na linha de plantio sobre o resíduo cultural do milho e da soja remanescente e plantio de cebola em solo preparado com uma aração + duas gradagens + destorroamento manual com enxada sobre o resíduo cultural do milho e da soja remanescente. Na sequência o solo na área experimental permaneceu sob cultivo na forma de semeadura direta. Sobre essa condição experimental desenvolveu-se a presente pesquisa descrita na sequência.

#### **5.1.4. Sistematização do terreno, tratamentos e delineamento experimental dos tratamentos**

Em abril de 2020, foi realizada a semeadura de aveia (*Aveia sativa*), na forma de semeadura direta, em seis parcelas do experimento onde foram instalados três tratamentos após o cultivo do solo. Duas parcelas permaneceram em pousio, nas quais foi instalado o tratamento sem cultivo em solo descoberto servindo de testemunha. Em agosto do mesmo ano a parte aérea da vegetação de aveia existente nas parcelas cultivadas foi totalmente retirada da superfície do solo, deixando a superfície do solo completamente descoberta.

Sobre essa condição, os três tratamentos constituídos de dose do adubo superfosfato triplo (SFT) foram instalados nos locais onde havia se realizado o cultivo da aveia. Um tratamento constituído de solo sem cultivo e descoberto, recém-preparado com uma aração + duas gradagens + duas rasteladas, também foi instalado. A superfície do solo nos tratamentos foi trabalhada de modo a apresentar rugosidade superficial mínima e ausência quase completa de cobertura superficial por resíduos culturais. Os tratamentos foram descritos como segue. A) Tratamentos instalados sobre o solo com adubação, como segue. Tratamento 1 – 200 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo, equivalente a 132 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ou a 58 kg ha<sup>-1</sup> de P puro, com declividade

de  $0,139 \text{ m m}^{-1}$ . Tratamento 2 –  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  de superfosfato triplo, equivalente a  $264 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ou a  $116 \text{ kg ha}^{-1}$  de P puro, com declividade de  $0,110 \text{ m m}^{-1}$ . Tratamento 3 –  $800 \text{ kg ha}^{-1}$  de superfosfato triplo, equivalente a  $396 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ou a  $174 \text{ kg ha}^{-1}$  de P puro, com declividade de  $0,137 \text{ m m}^{-1}$ . B - Tratamento instalado sobre o solo sem cultivo e sem adubação, como segue. Tratamento 4 – 0 (zero)  $\text{kg ha}^{-1}$  de superfosfato triplo (testemunha), com declividade de  $0,116 \text{ m m}^{-1}$ . A declividade aqui referida é a média das duas repetições. Nos tratamentos 1, 2 e 3, o adubo foi distribuído manualmente, de maneira uniforme sobre a superfície do solo, uma única vez imediatamente antes de aplicar o primeiro teste de chuva simulada. Na figura 1 encontra-se a vista de uma parcela recém-instalada.

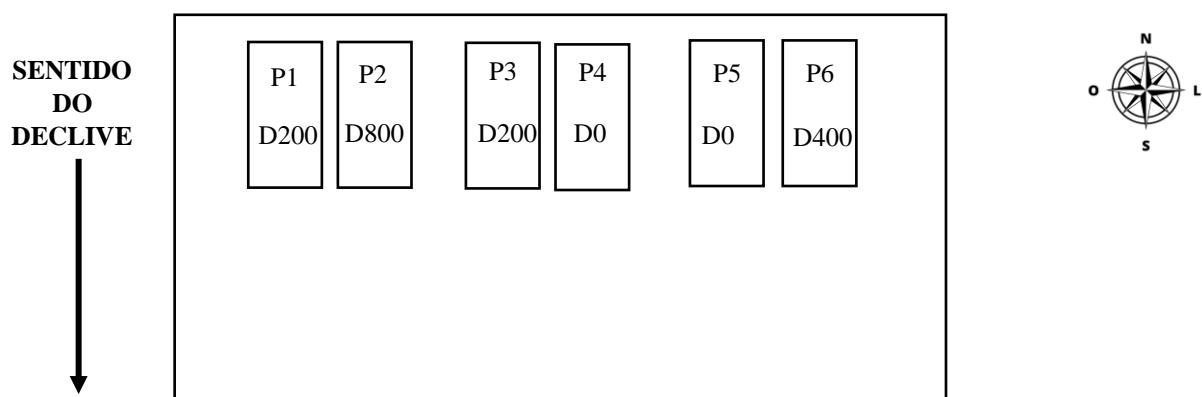
Figura. 1: Parcela descoberta e sem cultivo recém-instalada no experimento.

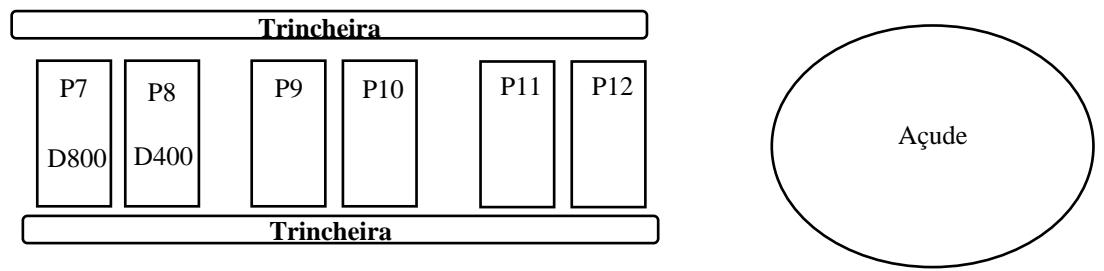


Fonte: Autora (2020).

O delineamento experimental dos tratamentos consistiu-se em um bloco com as parcelas distribuídas espacialmente de inteiramente casualizado, em que cada tratamento continha duas repetições de campo. A distribuição espacial das parcelas na área experimental está demonstrada na figura 2.

Figura. 2 Esquema demonstrativo da distribuição espacial das parcelas, com indicação dos tratamentos, na área experimental.





Fonte: Autora (2022), adaptado de Santos (2019).

### 5.1.5. Simulador de chuva e chuvas simuladas aplicadas

Para aplicação das chuvas simuladas, foi utilizado um simulador de chuva de braços rotativos tipo empuxo, conforme figura 3 (Bertol et al., 2012). O simulador contém 12 braços cada um com 7,5 m de comprimento, distribuídos radialmente e na torre. Em cada braço três aspersores estão colocados, totalizando 30 aspersores de maneira a formar uma espiral concêntrica perfeita. Na extremidade de quatro braços, opostos, está colocado um aspersor para viabilizar o empuxo da água e, com isso, provocar o giro do simulador.

Figura 3. Simulador de chuva tipo empuxo em operação na pesquisa



Fonte: (Bertol et al., 2012).

Em cada tratamento foram aplicadas quatro chuvas simuladas, cada uma com 45 minutos de duração e intensidade constante e planejada de  $80 \text{ mm h}^{-1}$ . Assim, foram realizados quatro testes de chuva, cada teste composto por quatro chuvas, totalizando 16 chuvas simuladas ao longo do período da pesquisa. A primeira chuva simulada foi aplicada em 30 de agosto de 2020, a segunda chuva 20 dias após a primeira e, a terceira e a quarta, 20 e 40 dias após a segunda chuva, respectivamente. As parcelas foram cobertas com lona plástica no intervalo entre os testes de chuva simulada (Figura 4). Este procedimento teve o objetivo e proteger o solo da influência de eventos de chuva natural que eventualmente pudessem ocorrer durante a pesquisa.

Figura 4. Parcela coberta com lona plástica recém-instalada no experimento.



Fonte: Autora (2020).

## 5.2. COLETA DE AMOSTRAS DO SOLO E QUANTIFICAÇÃO DA EROSÃO

### 5.2.1. Amostras do solo

Amostras do solo foram coletadas em quatro camadas: 0-2,5 cm; 2,5-5 cm; 5-10 cm; e 10-20 cm, em três momentos, imediatamente antes e imediatamente após aplicar o adubo e ao final do período experimental, em uma única posição no centro da parcela. Ainda, amostras do solo na camada de 0-2,5 cm, foram coletadas em cinco momentos, imediatamente antes e imediatamente após aplicar o adubo, e ao final da primeira, segunda, terceira e quarta chuva simulada, em duas posições em cada parcela: uma, na extremidade superior da parcela e, outra, na extremidade inferior. Nestas amostras foi determinado o teor de fósforo. Imediatamente antes de iniciar as chuvas simuladas, foram coletadas amostras de solo deformadas para determinação do teor de água, nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m de profundidade, em apenas um ponto no centro de cada parcela. O teor de água no solo foi calculado em base gravimétrica, conforme a fórmula a seguir.

$$Ug = (m_{SU} - m_{SS}) m_{SS}^{-1}, \text{ onde:} \quad (1)$$

$Ug$  = umidade gravimétrica ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

$m_{SU}$  = massa de solo úmido (g) e;

$m_{SS}$  = massa de solo seco (g).

### **5.2.2. Amostras de enxurrada para cálculo das perdas de solo e água**

A determinação da taxa instantânea de enxurrada e das perdas de solo e água foi realizada conforme a metodologia descrita em Bertol et al. (2019). Após a identificação do início do escoamento, com um balde graduado com capacidade de 15 L foi coletado um volume da enxurrada a cada 5 minutos, marcando o tempo necessário para o total enchimento de volume, para assim determinar a taxa instantânea de escoamento. Neste mesmo momento, foi coletado um pote de 0,75 L com o intuito de determinar a concentração de sedimentos e de água na enxurrada, para o posterior cálculo das perdas totais de solo e água.

### **5.2.3. Velocidade da enxurrada**

A velocidade da enxurrada foi medida quando a taxa de enxurrada estava estável, aos 40 minutos após o início da chuva simulada, conforme metodologia descrita em Bertol et al (2019). Foram demarcados com estacas os 6 m centrais das parcelas (2,5 m acima e 2,5 m abaixo das extremidades das parcelas). Na extremidade superior dos 6 m foi jogado o corante azul de metileno (2%) e cronometrado o tempo necessário em que o líquido corado percorreu o caminho até a extremidade inferior dos 6 m.

### **5.2.4. Índice D<sub>50</sub> dos sedimentos transportados na enxurrada**

A coleta de amostras de enxurrada para determinação do diâmetro mediano ponderado dos sedimentos (índice D<sub>50</sub>) foi realizada conforme metodologia descrita em Cogo et al. (1981). As amostras de enxurrada foram coletadas no momento de vazão constante do escoamento superficial, aos 40 minutos de duração de cada chuva. A partir desse momento a taxa de erosão não é influenciada pela oscilação da taxa de descarga que ocorre antes da mesma alcançar taxa constante (BARBOSA et al., 2009). Para determinação desse índice, em campo foi usado um conjunto de quatro peneiras com malha de 2; 1; 0,50 e 0,25 mm. Nessa ordem, as peneiras foram colocadas sobre um balde com capacidade para 2 L e esse conjunto posicionado sob o fluxo até o completo preenchimento do balde. Em seguida, os agregados retidos na malha das peneiras foram transferidos para potes plásticos que, ao final do teste de chuva encaminharam-se ao laboratório.

### **5.2.5. Volume e intensidade de chuva**

O volume e a intensidade das chuvas simuladas aplicadas foram quantificados usando 22 pluviômetros dispostos ao redor das parcelas, dentro da área de molhamento do simulador de chuva, segundo a calibração e recomendação de Bertol et al. (2012). Em cada pluviômetro a área de captação é de 53,85 cm<sup>2</sup>. As leituras dos pluviômetros foram realizadas manualmente, em provetas graduadas, imediatamente após o término dos 45 minutos de chuva.

Durante a chuva, em intervalos de cinco minutos a partir do início do escoamento superficial foi registrada a vazão com auxílio de um cronômetro e de um recipiente graduado, ao final do cano de PVC de seis metros. Para isso, durante um período determinado o volume de enxurrada foi coletado. Com essas informações já obtidas em campo, posteriormente, foi calculada a taxa e perda total de água. Ao mesmo tempo, ou seja, também a cada cinco minutos, um recipiente de plástico com capacidade 0,8 L foi preenchido com enxurrada para posterior cálculo da taxa e perda total de solo. Esses procedimentos seguiram a metodologia descrita em Santos (2019). Ainda nesses mesmos momentos, a cada cinco minutos, amostra de enxurrada foi coletada para análise química do material erodido, de acordo com procedimento descrito em Barbosa et al. (2009), utilizando-se pote plástico com capacidade de 0,25 L. Estas amostras foram acondicionadas em caixa térmica e ao final da chuva levadas ao laboratório onde estão acondicionadas em freezer até o momento de sua análise. Também foram coletadas amostras da água do reservatório de onde foi bombeada para o simulador, acondicionada na mesma caixa térmica e no mesmo freezer em laboratório, para posterior análise química.

### **5.2.6. Recepção e processamento das amostras no laboratório**

Após cada coleta, as amostras do solo foram encaminhadas para o laboratório de Uso e Conservação de Solo. No laboratório, primeiramente as amostras foram pesadas para determinar o teor de água no solo e, após, acondicionadas em estufa de circulação forçada para secagem a temperatura de 105° C por 24 horas, pesando-as. As amostras para a determinação da concentração de sedimentos e de água na enxurrada foram pesadas e, após, adicionada 3 a 4 gotas de ácido clorídrico (2,5 N) para acelerar a floculação das partículas de solo dispersas, deixando em repouso por 72 h para ocorrer à decantação. Após este período, foi retirado o excesso de água das amostras com a ajuda de um sifão, levando-as para estufa onde secaram a

temperatura de 50° C por 72 horas. Para o índice D<sub>50</sub>, os sedimentos retidos nas peneiras que foram transferidos durante a chuva para potes plásticos, foram levados à estufa a 50° C para secagem e após 72 horas pesados novamente. O conteúdo do balde passado pelo conjunto de peneiras no campo foi derramado sobre um outro conjunto com malhas de 0,125; 0,053; e 0,038 mm que estavam dispostas sobre outro balde. O conteúdo retido nas peneiras e depositados no balde deste último conjunto foi seco em estufa a 50° C por 72 horas e pesado. Assim, foram determinadas as seguintes classes de tamanho de sedimentos, considerando as amostras retidas nas peneiras em campo e em laboratório: >4,75; 4,75-2; 2-1; 1-0,25; 0,25-125; 0,125-0,053; 0,053-0,038; e <0,038 mm.

### **5.2.7. Cálculo da intensidade, volume e erosividade das chuvas aplicadas**

A intensidade e o volume das chuvas aplicadas foram calculados com base no volume coletado nos 22 pluviômetros lidos no campo nas provetas após cada chuva simulada. O cálculo da intensidade da chuva foi feito pela fórmula que segue.

$$I = 10 (V_m A^{-1} T^{-1}), \text{ onde:} \quad (2)$$

I = intensidade aplicada ( $\text{mm h}^{-1}$ );

$V_m$  = volume médio coletado nos pluviômetros (ml);

A = área de captação do pluviômetro ( $53,85 \text{ cm}^2$ ) e;

T = duração da chuva (h).

A altura total de chuva aplicada foi calculada multiplicando a intensidade (I) pela duração da chuva (D), conforme a fórmula que segue.

$$Q = I \times D, \text{ onde:} \quad (3)$$

Q = altura de chuva aplicada (mm);

I = intensidade da chuva aplicada ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e;

D = duração do teste de chuva (h).

Para o cálculo da erosividade (EI) das chuvas simuladas, foi utilizada a equação proposta por Meyer (1958), conforme demonstrado a seguir.

$$EI = 0,2083 Q I, \text{ onde:} \quad (4)$$

$EI$  = erosividade das chuvas ( $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ );

$Q$  = altura de chuva aplicada (mm) e;

$I$  = intensidade da chuva aplicada ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

### 5.2.8. Cálculos e ajustes realizados para as perdas de solo e água

Por meio de uma planilha, foram calculadas as taxas instantâneas de perdas de solo e água para intervalos de 1 min por interpolação linear dos valores coletados em campo a cada 5 min. A concentração de sedimentos existente na enxurrada foi calculada dividindo-se a massa de sedimentos pela massa de sedimentos + água. Assim, a taxa instantânea de perda de solo resultou da multiplicação da taxa instantânea de enxurrada pela concentração instantânea de sedimentos. A massa total de solo perdido por erosão foi obtida pela integração das taxas instantâneas de perda de solo, extrapolando-se os resultados gerados na área da parcela para um hectare. Para efeito de comparação dos resultados, estes foram padronizados. Os dados de perda total de água e perda total de solo foram ajustados para a intensidade de chuva planejada de 80  $\text{mm h}^{-1}$ , conforme definido por Cogo (1981). As perdas de água ajustadas foram obtidas seguindo a equação a seguir.

$$FCI = i_{\text{planejada}} i_{\text{aplicada}}^{-1}, \text{ onde:} \quad (5)$$

$FCI$  = fator de correção da intensidade para a perda total de água;

$i_{\text{planejada}}$  = intensidade de chuva planejada ( $80 \text{ mm h}^{-1}$ );

$i_{\text{aplicada}}$  = intensidade de chuva que foi medida durante os testes de chuva simulada ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

O ajuste das perdas de solo para a intensidade da chuva foi efetuado elevando-se ao quadrado o resultado da divisão obtido pela equação (5), conforme a equação a seguir.

$$FCI = (i_{\text{planejada}} i_{\text{aplicada}}^{-1})^2, \text{ onde:} \quad (6)$$

FCI = Fator de correção da intensidade para a perda total de solo;

$i_{\text{planejada}}$  = intensidade de chuva planejada ( $80 \text{ mm h}^{-1}$ );

$i_{\text{aplicada}}$  = intensidade de chuva que foi medida durante os testes de chuva simulada ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

Os dados de perda de solo ajustados para a intensidade ainda foram ajustados para a declividade do terreno, de acordo com a declividade o terreno em cada parcela (fator S) com base na declividade média das parcelas ( $0,134 \text{ m m}^{-1}$ ), seguindo o método descrito na Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (WISCHMEIER & SMITH, 1978). O ajuste para a declividade foi baseado na seguinte equação.

$$S = 0,065 + 4,56 \operatorname{sen} \theta + 65,41 (\operatorname{sen} \theta)^2, \text{ onde:} \quad (7)$$

S = fator declividade da USLE e;

$\theta$  = ângulo de declive do terreno.

O fator de correção para a declividade (FCS) foi obtido pela divisão do fator S da parcela cujo dado se queria corrigir pelo fator S da declividade média das parcelas, conforme demonstrado na equação a seguir.

$$FCS = S_{\text{parcela}} S_{\text{média}}^{-1}, \text{ onde:} \quad (8)$$

FCS = fator de correção para a declividade;

$S_{\text{parcela}}$  = fator S da declividade da parcela e;

$S_{\text{média}}$  = fator S da declividade média de todas as parcelas experimentais ( $0,134 \text{ m m}^{-1}$  neste caso).

As perdas de solo foram ajustadas multiplicando-se as perdas observadas na parcela pelos dois fatores de correção (FCI da eq. 6 e FCS da eq. 8), conforme a expressão que segue.

$$P_{\text{solo ajustada}} = PS_{\text{parcela}} FCI FCS, \text{ onde:} \quad (9)$$

$P_{\text{solo ajustada}}$  = perda de solo ajustada para a intensidade e declividade ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );

$PS_{\text{parcela}}$  = perda de solo da parcela ( $\text{t ha}^{-1}$ );

FCI = fator de correção para intensidade e;

FCS = fator de correção para a declividade.

As perdas de solo foram expressas na unidade  $t \text{ ha}^{-1}$  ao final dos ajustes. Para isso, as perdas observadas e ajustadas conforme as equações 5, 6, 7, 8 e 9 foram finalmente ajustadas para comprimento de declive maior do que o da parcela padrão. Só assim foi possível extrapolar as perdas observadas na parcela padrão com  $38 \text{ m}^2$  para o hectare ( $10.000 \text{ m}^2$ ). Esse ajuste foi realizado automaticamente pelo programa de cálculo das perdas de solo no momento de tratamento dos dados, de acordo com a equação do fator L da USLE, conforme segue.

#### **5.2.9. Amostras de enxurrada para análise química**

Amostras de enxurrada foram coletadas, a cada 10 minutos durante a ocorrência de escoamento, em potes com volume de  $250 \text{ mL}$ . Foram coletadas amostras da suspensão, em duas repetições para cada caso, nas quais foi determinado o teor de fósforo solúvel na água da suspensão, após filtradas. As amostras de suspensão foram armazenadas em refrigerador a temperatura de  $2^\circ\text{C}$ , para posterior análise.

### **5.3. DETERMINAÇÕES EM LABORATÓRIO**

A análise nas amostras do solo e dos sedimentos coletadas em campo seguiram as metodologias descritas em Tedesco et al. (1995). Em laboratório, cada amostra foi dividida em duas para o devido controle analítico. O fósforo foi extraído por duplo ácido (Mehlich-1), sendo determinado por colorimetria. O teor de fósforo solúvel na água da enxurrada foi determinado diretamente por colorimetria. A taxa de enriquecimento em fósforo foi calculada pela relação do teor nos sedimentos da erosão com o teor na camada de  $0\text{-}2,5 \text{ cm}$  do solo que foi coletado nas parcelas. Ainda, essa mesma taxa de enriquecimento foi estimada pela relação gráfica entre o teor de fósforo contido na camada de  $0\text{-}2,5 \text{ cm}$  do solo em cada parcela e o teor nos sedimentos.

### **5.4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO ESTATÍSTICO**

O experimento foi instalado utilizando o delineamento de parcelas distribuídas inteiramente ao acaso, com duas repetições, e um único bloco. Não foi realizada análise estatística de

comparação de médias devido à variação de declividade entre repetições do mesmo tratamento. Por isso, as perdas de solo e água são apresentadas por repetição individualizada. Os dados de concentração de P no solo e nos sedimentos e água de enxurrada são apresentados como a média das repetições. Análise de regressão entre dados foram realizadas, quando pertinente. Utilizou-se o modelo linear do tipo  $y=a+bx$ , o potencial crescente do tipo  $y=x^b$ , o exponencial decrescente do tipo  $y=ae^{-bx}$  e o exponencial decrescente do tipo  $y=a+ce^{-bx}$ , os quais foram ajustados aos valores de diversas variáveis.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Intensidade e volume das chuvas

A intensidade das chuvas aplicadas sobre os diferentes tratamentos de dose de superfosfato triplo (STF), em cada repetição, é apresentada na Tabela 1. Nota-se que houve elevada homogeneidade nos valores de intensidade da chuva, em muitos casos inclusive igualdade desses valores, na comparação dos testes de chuva dentro de cada tratamento. Destaca-se maior variação nos testes 3 e 4 com alguns valores levemente menores do que nos demais testes. Comparando os tratamentos dentro de cada teste de chuva, também houve expressiva homogeneidade nos valores de intensidade das chuvas aplicadas. Aqui destacam-se os tratamentos D400 (R1) no teste 3, D400 (R2) no teste 4 e D800 (R2) também no teste 4 com valores de intensidade de chuva levemente menores do que os demais. Esses desvios (DP) podem ser explicados pelo erro humano, já que a intensidade da chuva era dependente do controle manual feito no registro que regulava a entrada de água no sistema do simulador de chuva. Essa entrada de água era identificada pela pressão no manômetro situado a frente do registro.

Tabela 1: Intensidade observada das chuvas simuladas aplicadas em cada repetição (R) dos diversos tratamentos de dose (D) de superfosfato triplo (SFT), em chuvas com duração de 45 minutos cada uma.

Tratamento (Dose SFT)	Teste de chuva				Média	DP
	1	2	3	4		
Kg ha <sup>-1</sup>	-----	-----	mm h <sup>-1</sup>	-----		
D0 R1	86	86	85	86	86	0,4
D0 R2	87	87	74	86	84	4,9

Média	87	87	80	86	85	2,6
D200 R1	87	87	86	85	86	0,7
D200 R2	86	86	85	86	86	0,4
Média	87	87	86	86	86	0,4
D400 R1	87	87	74	86	83	4,9
D400 R2	87	86	81	77	83	3,6
Média	87	87	78	82	83	3,3
D800 R1	87	87	86	85	86	0,7
D800 R2	87	87	81	77	83	3,7
Média	87	87	84	81	85	2,2

DP: desvio padrão. Fonte: Autora (2022).

A variação de intensidade da chuva entre repetições (Tabela 1) pode ter sido parcialmente influenciada também pela ação do vento que derivava a água da chuva para um lado dependendo de sua orientação. A intensidade da chuva simulada aplicada está de acordo com Cardoso et al. (1998). Segundo os autores, a intensidade de  $80 \text{ mm h}^{-1}$  é prevista período de retorno de 20 anos para o padrão de chuvas da região onde a pesquisa foi realizada.

## 6.2. Fósforo no solo

O teor de fósforo (P) na superfície do solo diminuiu com o aumento do número de chuvas (da 2<sup>a</sup> para a 6<sup>a</sup> coleta), com exceção da dose 0 (zero) de SFT (Tabela 2), de acordo com Barbosa et al. (2009). Por outro lado, houve aumento com o aumento da dose de SFT a partir da 2<sup>a</sup> coleta, conforme verificado também por Bertol et al. (2014).

Tabela 2: Fósforo na camada de 0-0,025 m do solo, em cada tratamento (T) de dose do superfosfato triplo (SFT), na posição (P) superior (S) e inferior (I) da parcela, em cada uma das coletas de amostras do solo (média das repetições).

T (SFT) Kg ha <sup>-1</sup>	P	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	MC
		mg dm <sup>-3</sup>						
0	S	4,55A	5,55A	5,70A	5,12A	5,04A	4,89A	5,31
	I	6,81A	6,81A	6,62A	6,81A	5,71A	5,62A	6,40
	CV (%)	9	16	6	18	4	11	-
	I/S	1,50	1,23	1,16	1,33	1,13	1,15	1,21
200	MR	5,68A	6,18D	6,16C	5,97C	5,38B	5,26C	5,77
	S	14,60A	49,65A	31,78B	27,47B	23,42B	14,05A	26,83
	I	17,60A	42,75A	37,28A	32,39 <sup>a</sup>	29,00A	16,49A	29,25
	CV (%)	28	16	18	19	23	1110	-
400	I/S	1,21	0,86	1,17	1,18	1,14	1,17	1,09
	MR	16,10A	46,20C	34,53B	29,93B	26,21A	15,50B	28,08
	S	10,20A	89,17A	29,06B	31,16B	26,76B	16,00A	33,73
	I	13,78A	91,09A	36,37A	62,49A	36,55A	19,34A	43,27
400	CV (%)	35	28	29	43	17	23	-

	I/S	1,35	1,02	1,25	2,01	1,37	1,21	1,28
	MR	11,99A	90,13B	32,72B	45,76AB	31,66A	17,67B	38,32
	S	13,93A	257,54A	82,48B	53,50B	40,34B	35,61A	80,57
	I	14,02A	255,84A	123,64A	60,75A	45,32A	37,39A	89,82
800	CV (%)	25	18	12	22	18	28	-
	I/S	1,01	0,99	1,50	1,14	1,12	1,05	1,11
	MR	13,98A	256,69A	103,06A	57,13A	42,83A	37,50A	85,20
	CV (%)	41	38	27	42	38	35	-
	Média posição S	11,07	100,48	37,26	29,31	23,89	17,64	36,61
	Média posição I	13,05	99,12	50,98	40,61	29,15	20,21	42,19
	Média de I/S	1,18	0,99	1,37	1,39	1,22	1,15	1,15
	Média geral	11,94	99,80	44,12	34,70	26,52	19,98	39,51

1<sup>a</sup>: coleta realizada imediatamente antes da adubação; 2<sup>a</sup>: coleta realizada imediatamente após a adubação; 3<sup>a</sup>: coleta realizada entre a 1<sup>a</sup> e a 2<sup>a</sup> chuva; 4<sup>a</sup>: coleta realizada entre a 2<sup>a</sup> e a 3<sup>a</sup> chuva; 5<sup>a</sup>: coleta realizada entre a 3<sup>a</sup> e a 4<sup>a</sup> chuva; 6<sup>a</sup>: coleta realizada imediatamente após a 4<sup>a</sup> chuva. MR: média das repetições; MC: média das coletas. CV: coeficiente de variação. Na coluna, letras minúsculas comparam os tratamentos (valores de MR) entre si, e letras maiúsculas comparam os valores de S com os de I dentro de cada tratamento ( $p<0,05$ ). DP: desvio padrão. Fonte: Autora (2022).

A resposta do teor de P na superfície do solo ao número de chuvas e à dose de adubo em solo sem cultivo e descoberto, portanto, mostrou-se semelhante à ocorrida em solo cultivado. Também, verificou-se importante acumulação de P na posição inferior (I) da parcela em relação à superior (S), a partir da 3<sup>a</sup> coleta. Isso confirmou o fato de que houve arraste do elemento na extensão de 11 m sobre o solo. Assim houve acumulação de parte do P antes do final do declive, na maioria das situações para as doses de 200, 400 e 800 kg ha<sup>-1</sup> de SFT. O transporte parcial de P adsorvido aos sedimentos, ao longo do declive, com deposição de parte dele na superfície do solo ao longo do trajeto da enxurrada, é comum em solos cultivados, conforme Gebler et al. (2012a), Gebler et al. (2012b) e Barbosa et al. (2009), do mesmo modo como verificado nesta pesquisa. Portanto, o fato de ter havido remoção do elemento do local situado na posição superior do declive com depósito na posição inferior, indica que pode ter havido enriquecimento em P no local de depósito.

As doses de 200, 400 e 800 kg ha<sup>-1</sup> de SFT resultaram respectivamente em aumento de 2,9; 7,5; e 18,4 vezes no teor de P na superfície do solo (Tabela 2). Isso foi decorrente da presença do adubo aplicado (2<sup>a</sup> coleta) em relação à ausência do adubo (1<sup>a</sup> coleta), na média das posições S e I na parcela. Esse aumento deveu-se ao aporte do elemento pela adubação, conforme verificado também por Bertol et al. (2014) em condição de solo cultivado. Entre o início e o final da pesquisa, o teor de P na superfície diminuiu 66% na dose 200 kg ha<sup>-1</sup> de SFT, 79% na dose 400 e 85% na dose 800 kg ha<sup>-1</sup>, na média das posições S e I na parcela, comparando valores da 6<sup>a</sup> coleta (após a 4<sup>a</sup> chuva) com os da 2<sup>a</sup> coleta (antes da 1<sup>a</sup> chuva). Portanto, foi expressivo o transporte do elemento pela enxurrada ao longo do declive de solo sem cultivo. Esse

transporte aumentou com o aumento de dose do adubo, conforme verificado também por Barbosa et al. (2009) e Bertol et al. (2014) em condição de solo cultivado.

O quociente de P, entre os teores na posição inferior (I) e superior (S) da parcela (I/S) era de 1,18 antes da aplicação do SFT (1<sup>a</sup> coleta), na média dos tratamentos, com alguma variação entre eles (Tabela 2). Após a aplicação do adubo (2<sup>a</sup> coleta) esse quociente foi praticamente 1 (um), com pequena variação entre tratamentos. Isso indica que houve uniformidade na distribuição do adubo na superfície do solo. Entre a 3<sup>a</sup> e a 6<sup>a</sup> coleta de amostras do solo, ou seja, no intervalo entre o momento após a 1<sup>a</sup> coleta e o momento após a 4<sup>a</sup> chuva simulada, os valores de I/S foram maiores do que a unidade. Isto significa que houve arraste de P da posição S para a I, caracterizando enriquecimento do solo na posição I em relação à posição S do declive. Esse enriquecimento diminuiu ao longo dos testes de chuva simulada. Isso significa que o P depositado na posição I na 1<sup>a</sup> chuva, por exemplo, foi removido para outros locais, e até para fora da parcela, pelas chuvas seguintes. Taxa de enriquecimento do solo em P, causada pela erosão hídrica, foi reportada por Sharpley et al. (1981), Sharpley et al. (1987), Sharpley et al. (1994), Lewis & Wurtsbaugh (2008) e Sharpley (2016), para condição de solo cultivado, enquanto, Pinheiro et al. (2010) e Souza (2011) constataram não ter havido esse enriquecimento, e sim empobrecimento do solo.

### **6.3. Fósforo nos sedimentos e água de enxurrada**

Nos sedimentos com diâmetro < 0,038 mm o teor de P foi alto comparado ao dos sedimentos com maior diâmetro nas doses de 200, 400 e 800 kg ha<sup>-1</sup> de SFT (Tabela 3) e comparado ao teor no solo na camada de 0-0,025 m (Tabela 1). Dados semelhantes a esses foram verificados também por outros autores (Sharpley et al., 1994; Lewis & Wurtsbaugh, 2008) em solos cultivados. A capacidade de sedimentos minerais adsorverem P quimicamente aumenta com o aumento de área superficial específica e de atividade química dos mesmos. Os sedimentos de menor diâmetro adsorvem mais P do que os sedimentos de maior diâmetro, devido a diferença de teor de argila (Sharpley et al. (1994)). Nos tratamentos 200, 400 e 800 kg ha<sup>-1</sup> de SFT, a diferença de teor de P entre os sedimentos < 0,038 mm e > 2,000 mm foi respectivamente de 259%, 241% e 158%.

O aumento de dose do SFT resultou em aumento no teor de P em praticamente todos os diâmetros de sedimentos (Tabela 3). Esse aumento foi 2,5 vezes da dose 200 para a dose 800 kg ha<sup>-1</sup> de SFT, na média dos sedimentos. O aumento foi maior nos sedimentos com diâmetro entre 0,125 e 0,250 mm e entre 0,500 e 1,000 (4,5 e 4,3 vezes, respectivamente), e menor nos

sedimentos com diâmetro entre 1,000 e 2,000 mm (1,3 vezes). Com esses resultados é possível infere-se que o risco de contaminação de águas por P aumenta quando se aumenta a dose de adubo aplicado na superfície do solo e também quando os sedimentos perdidos por enxurrada são de menor diâmetro.

No tratamento 200 kg ha<sup>-1</sup> de SFT, o teor de P foi 75% maior do que o teor existente no solo (Tabela 3). Nos tratamentos 400 e 800 a referida diferença foi respectivamente de 173% e 23%. Isto significou taxa de enriquecimento muito alta na maioria dos casos, com alto risco de contaminação por P nos locais de possível depósito desses sedimentos. Altas taxas de enriquecimento por P em áreas de cultivo agrícola são comuns, constatadas por Lewis & Wurtsbaugh (2008), Barbosa et al. (2009), e Engel et al. (2009) embora não tão altas quanto às encontradas nesta pesquisa. Assim, verificou-se que altas doses de adubo fosfatado aplicado na superfície de solo sem cultivo geraram taxas de enriquecimento em geral maiores do que aquelas verificadas por outros autores em solo com cultivo.

Tabela 3: Teor de fósforo por diâmetro de sedimentos transportados pela enxurrada e retidos na malha das peneiras (média das repetições e das chuvas), e na água de enxurrada (média das repetições), em cada tratamento de dose de SFT.

Malha da peneira	0 kg ha <sup>-1</sup> SFT	200 kg ha <sup>-1</sup> SFT	400 kg ha <sup>-1</sup> SFT	800 kg ha <sup>-1</sup> SFT	CV
Mm	----- mg dm <sup>-3</sup> -----				%
< 0,038	9,96aC	49,24aB	104,44aA	104,45aA	31
0,038 a 0,125	7,92aD	42,51abC	79,72abAB	99,29aba	22
0,125 a 0,250	6,55aD	18,81cC	65,37abAB	84,42abA	29
0,250 a 0,500	9,00aC	32,98abB	57,95abAB	76,82bcA	19
0,500 a 1,000	5,35aB	16,34cB	38,69bAB	70,96cA	45
1,000 a 2,000	6,89aC	31,43bcBC	46,68bA	39,95dBC	31
> 2,000	5,59aC	13,70cBC	30,60bAB	40,48dA	32
Média	7,32	29,04	60,50	73,77	-
CV (%)	37	27	36	14	-
Amostra de enxurrada	0 kg ha <sup>-1</sup> SFT	200 kg ha <sup>-1</sup> SFT	400 kg ha <sup>-1</sup> SFT	800 kg ha <sup>-1</sup> SFT	CV
Nº	----- mg L <sup>-1</sup> -----				%
	Teste 1 de chuva				
1	0,33aC	116,47aB	134,71aA	128,78aA	4
2	0,85aB	100,57aA	113,32bA	121,52aA	19
3	0,36aC	16,90bB	26,39cB	63,78bA	39
4	0,72aC	7,07bB	10,70dAB	22,85cA	41
5	0,44aD	5,11bC	7,04dB	13,86cA	8
Média	0,54	49,22	58,43	70,16	-
CV (%)	51	28	7	19	-
	Teste 2 de chuva				
1	0,34aC	0,60aC	2,49aB	6,40Aa	25
2	0,24aB	0,57aB	1,46bB	3,65Ba	40

3	0,79aB	0,67aB	1,18aA	1,70bA	31
4	0,38aB	1,36aA	1,25bA	2,30Ba	35
5	0,44aB	1,27aAB	1,45bAB	1,81Ba	29
Média	0,44	0,89	1,56	3,17	-
CV (%)	78	60	17	25	-
Teste 3 de chuva					
1	0,34aB	0,34aB	0,60aB	1,36Aa	39
2	0,15aB	0,41aB	0,40aB	1,03abA	36
3	0,28aA	0,24aA	0,29aA	0,72bA	38
4	0,51aA	0,21aB	0,53aA	0,72bA	54
5	0,25aBC	0,14aC	0,51aB	1,06abA	22
Média	0,31	0,27	0,47	0,98	-
CV (%)	82	55	81	21	-
Teste 4 de chuva					
1	0,26aB	0,49aAB	0,22aB	0,64aA	33
2	0,29aA	0,38aA	0,37aA	0,25aA	39
3	0,13aA	0,43aA	0,27aA	0,48aA	47
4	0,35aB	0,23aB	0,18aB	0,76aA	35
5	0,25aA	0,51Aa	0,23aA	0,40aA	36
Média	0,25	0,41	0,25	0,51	-
CV(%)	56	27	65	39	-
Média geral	0,39	12,70	15,18	18,71	-

CV: coeficiente de variação. Letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem ( $p<0,05$ ).

Fonte: Autora (2022).

Na água de enxurrada, o teor de P foi considerado baixo comparado ao teor encontrado nos sedimentos (Tabela 3) e no solo (Tabela 2). No entanto, tal teor foi alto em relação ao encontrado por outros autores em água de enxurrada em condição de solo cultivado (Barbosa et al., 2009; Engel et al., 2009; Bertol et al., 2017). O teor de P na água equivaleu a 5% do encontrado nos sedimentos de erosão e a 3% do encontrado no solo, na média, consistindo em grande diferença especialmente no tratamento 0 kg ha<sup>-1</sup> de SFT. Dados semelhantes foram verificados por Barbosa et al. (2009) e Bertol et al. (2017). O menor teor de P na água do que nos sedimentos de enxurrada neste tratamento se explica pelo fato de não ter sido aplicado adubo. Também, porque o P é pouco solúvel em água e fortemente adsorvido aos coloides do solo, conforme Sharpley et al. (1994). Além disso, na presente pesquisa o adubo fosfatado foi aplicado em superfície, sem incorporação ao solo.

O teor de P na água foi influenciado pelo efeito de dose do SFT e pelo momento durante a chuva, dentro de cada teste (Tabela 3). O teor de P na água de enxurrada aumentou com o aumento de dose. O aumento entre as doses 200 e 800 kg ha<sup>-1</sup> de SFT foi de 1,4 vezes nas chuvas do 1º teste, de 3,5 vezes no 2º teste, de 3,6 vezes no 3º e de 1,2 vezes nas chuvas do 4º teste, na média dos momentos de coleta das amostras de enxurrada. Essas diferenças são explicadas pelo aporte de P na enxurrada em decorrência da adubação, de acordo com o que foi constatado também por Bertol et al. (2017). Assim, o aumento da dose de SFT resultou em aumento de perdas de P por erosão.

Na análise dos dados não foi realizada estatística para comparar os testes de chuva entre si. Mesmo assim, é importante tecer considerações comparando os valores numéricos dos resultados. Assim, entre o 1º e o 2º teste de chuva, o teor de P na água diminuiu 98,2% na dose 200, 97,3% na dose 400 e 95,5% na dose 800 (Tabela 3). Essa tendência de diminuição pouco se modificou na comparação entre o 1º e o 4º teste de chuva, na média dos momentos de coleta das amostras. Essa expressiva diferença numérica na comparação já entre o 1º e o 2º teste, demonstrou que o efeito de sequência das chuvas simuladas foi expressivo na diminuição do teor de P na água de enxurrada. Assim, no 1º teste de chuva praticamente todo o P presente na superfície do solo foi transportado nos momentos iniciais do escoamento. Isso ocorreu independentemente da dose de adubo, apesar da chuva ter sido de curta duração, embora de alta intensidade.

Entre uma e outra coleta de amostra de enxurrada, variou o teor de P principalmente nos testes iniciais de chuva, nos três tratamentos que receberam adubo (Tabela 3). A diferença se prolongou até o 3º teste no tratamento  $800 \text{ kg ha}^{-1}$ . Assim, no 1º teste o teor do elemento na água diminuiu 96% na dose 200, 95% na dose 400 e 89% na dose  $800 \text{ kg ha}^{-1}$ , entre a 1ª e a 5ª coleta. No 3º teste essa diminuição foi de 22% na dose  $800 \text{ kg ha}^{-1}$ . Em solo sem cultivo e descoberto, os primeiros momentos após o início do escoamento foram os mais problemáticos do ponto de vista de transporte de P pela enxurrada. Isso foi constatado por ocasião da 1ª chuva após a aplicação de adubo fosfatado, independentemente de dose do adubo, cujo efeito se prolongou até a 3ª chuva.

O baixo teor de P solúvel na água de enxurrada (Tabela 3) pode não ter sido significante do ponto de vista agronômico, mas foi importante do ponto de vista ambiental. Esse teor superou o teor crítico tolerável de  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$  definido por Vollenweider (1971), em todas as condições avaliadas. Com isso, ficou claro que o teor de P encontrado na água de enxurrada representava elevado potencial de eutrofização de águas superficiais. Assim, a possível entrada dessa enxurrada em mananciais de água poderia representar risco de eutrofização, o que torna procedente a afirmação feita por Vollenweider (1971). Com isso, infere-se que é necessária a adoção de práticas de controle de escoamento superficial para evitar a produção de enxurrada com alta carga de P.

#### **6.4. Perdas totais de solo e água e de P nos sedimentos e água de enxurrada**

##### **6.4.1. Perdas totais de solo e água**

Não houve diferença numérica expressiva entre os tratamentos quanto a declividade do terreno (Tabela 4). Os valores oscilaram de 0,096 a 0,145 m m<sup>-1</sup> com média de 0,128 m m<sup>-1</sup> na repetição 1 (R1), e de 0,098 a 0,139 m m<sup>-1</sup> com média de 0,122 m m<sup>-1</sup> na repetição 2 (R2). A declividade média nessa área experimental é de 0,102 m m<sup>-1</sup> (Ramos et al., 2014).

As perdas de solo tenderam a diminuir com o aumento da dose de SFT aplicado, com poucas exceções (Tabela 4). O fertilizante foi aplicado pouco antes de iniciar o teste 1 de chuva simulada. Por isso não se pode afirmar que a dose de SFT tenha, diretamente, influenciado a erosão. É possível que a massa de adubo aplicado tenha indiretamente afetado a erosão, já que a menor dose foi 0 (zero) e a maior 800 kg ha<sup>-1</sup> de adubo. Assim, a cobertura do solo pelos grânulos do fertilizante pode ter tido algum efeito. No entanto, não se encontra na literatura trabalho algum que tenha sido realizado com esse tipo de tratamento e que esses tratamentos tenham influenciado a erosão.

De qualquer modo, é importante considerar que a perda de solo foi alta, independentemente do tratamento, com tendência bem definida de diminuir do teste 1 ao teste 4 de chuva (Tabela 4). A perda foi alta porque o solo encontrava-se descoberto. Fatores como o a inexistência de cultivo e consequentemente a ausência de cobertura no solo. Isso favoreceu a ação das gotas de chuva e da enxurrada na desagregação e transporte do solo, conforme Schick et al. (2000), Bertol et al. (2004) e Guadagnin et al. (2005) resultando em elevada perda de solo. Esse mesmo padrão foi anteriormente observado também no trabalho de Ramos et al. (2014). Tendeu a diminuir com o aumento do número de chuvas porque a primeira chuva transportou a maior parte do solo pronto para o transporte. Assim, na medida em que as chuvas foram se sucedendo foi diminuindo a quantidade de solo desagregado e prontamente disponível para a erosão, de acordo com Barbosa et al (2021).

O maior valor de perda de solo ocorreu na repetição 1 (R1) em praticamente todos os testes de chuva, com média de 13 t ha<sup>-1</sup>, enquanto na repetição (R2) o valor médio foi de 11 t ha<sup>-1</sup> (Tabela 4). No teste 1 de chuva ocorreram os maiores valores de perda de solo, com média de 13 t ha<sup>-1</sup> na R1 e 11 t ha<sup>-1</sup> na R2, em comparação aos demais testes. No teste 4 ocorreram os menores valores de perda de solo, com média de 5,75 t ha<sup>-1</sup> na R1 e 5,35 t ha<sup>-1</sup> na R2. Santos (2019) obteve resultado diferente, em estudo realizado na mesma área experimental, explicado pelo fato do solo estar coberto com resíduos culturais. Esta autora notou que no teste 1 houve menor perda de solo do que nos demais testes atingindo valores máximos nos testes 2 e 3 e decrescendo no teste 4 onde se verificou o menor valor.

Tabela 4: Declividade do terreno e perdas de solo e água, em cada repetição (R) e na média dos tratamentos (Trat) de dose (D) do superfosfato triplo (SFT).

Trat SFT	Declividade		Perdas de solo			Perdas de água		
	R1 Kg ha <sup>-1</sup>	R2 m m <sup>-1</sup>	R1 t ha <sup>-1</sup>	R2 Média	R1 --- % da chuva ---	R2 mm		
Teste 1 de chuva								
D0	0,133	0,098	18,0	14,5	16,3	91	89	90
D200	0,139	0,139	13,5	10,6	12,1	82	89	86
D400	0,096	0,124	11,9	10,4	11,2	90	84	87
D800	0,145	0,129	8,6	8,3	8,5	82	92	87
M	0,128	0,122	13,0	11,0	12,0	86	89	87
DP	0,019	0,015	3,4	2,2	2,8	4	2	1
Teste 2 de chuva								
D0	0,133	0,098	9,7	8,4	9,1	88	85	87
D200	0,139	0,139	8,9	7,6	8,3	83	87	85
D400	0,096	0,124	7,6	7,7	7,7	87	80	84
D800	0,145	0,129	5,3	5,1	5,2	73	79	76
M	0,128	0,122	7,9	7,2	7,6	83	83	80
DP	0,019	0,015	1,7	1,3	1,5	6	3	4
Teste 3 de chuva								
D0	0,133	0,098	7,5	7,5	7,5	89	81	85
D200	0,139	0,139	7,6	5,7	6,6	86	81	84
D400	0,096	0,124	7,8	6,7	7,3	84	89	87
D800	0,145	0,129	4,7	5,4	5,1	83	88	86
M	0,128	0,122	6,9	6,3	6,6	86	85	85
DP	0,019	0,015	1,3	0,8	0,9	2	3	1
Teste 4 de chuva								
D0	0,133	0,098	5,7	6,1	5,9	88	86	87
D200	0,139	0,139	6,9	5,4	6,2	83	86	85
D400	0,096	0,124	6,0	5,8	5,9	84	92	88
D800	0,145	0,129	4,4	4,1	4,3	89	92	91
M	0,128	0,122	5,8	5,4	5,6	86	89	88
DP	0,019	0,015	0,9	0,8	0,7	3	3	2

M: média. DP: desvio padrão. Fonte: Autora (2022).

A perda de água (PA) variou entre os tratamentos, numericamente, com valores entre 77% e 92% em relação ao volume de chuva aplicada. Diferente da perda de solo, a perda de água não diferiu entre os quatro testes de chuva. Seguiu um padrão, apresentando pequenas diferenças entre os tratamentos. A baixa oscilação entre os tratamentos quanto a perda de água é explicada pela infiltração de água no solo. Esta determina finalmente a perda de água, e é dependente da capacidade que o solo apresenta para infiltrar e armazenar água. Ao ser atingido o limite de infiltração, o excesso de chuva escoa, sem variações (KOHNKE, 1968; Bertol et al., 2007). Outro fator que pode explicar a semelhança de valor na perda de água, entre os tratamentos, foi semelhança entre os valores de umidade inicial do solo já que o solo foi mantido coberto entre um e outros testes de chuva.

Em geral, a perda de água apresentou valor alto (Tabela 4). No teste 1 foi de 87% da chuva aplicada, no teste 2 de 80%, no teste 3 foi de 85% e foi de 88% no teste 4. Isso pode ter se dado pelo fato de que a chuva simulada aplicada era planejada para uma alta intensidade ( $80 \text{ mm h}^{-1}$ ), conforme o proposto por Cardoso et al. (1998). A alta taxa de perda de água pode ter relação com a falta de cultivo nos tratamentos. Sem cultivo, a superfície do solo reduziu a infiltração de água e facilitou o escoamento superficial conforme Bertol (1995) e Mello (2002). Oliveira (2007) confirma que solos sem cobertura vegetal tendem a ter uma maior perda de água em relação a solo com cobertura total por resíduos culturais.

#### **6.4.2. Perdas totais de fósforo na água de enxurrada**

A perda total de P nos sedimentos de erosão foi em geral baixa, comparada à perda do elemento solúvel na água de enxurrada (Tabela 5), apesar da concentração de P ter sido relativamente alta na enxurrada (Tabela 3). Esse dado está em linha com o que foi observado por Bertol et al. (2004) e Barbosa et al. (2008). A perda de P nos sedimentos de erosão foi mais influenciada pela perda de solo (Tabela 4) do que pela concentração do elemento nos sedimentos. Considerando os tratamentos, a perda de P tendeu a aumentar com o aumento da dose do fertilizante SFT aplicado no solo. Simplesmente, esse aumento da perda decorreu do aumento na quantidade de P aplicado no solo, de acordo com o tratamento, conforme foi verificado por Bertol et al. (2007).

Considerando os tratamentos e testes de chuva, os valores de perda de P na água de enxurrada foram altos comparados aos valores de perda nos sedimentos (Tabela 5). A alta perda de P na água foi fortemente influenciada pelo volume de água perdida por escoamento superficial (Tabela 4). Os valores variaram amplamente, de  $0,140$  a  $39,290 \text{ kg ha}^{-1}$ , superiores aos encontrados por Leite (2004) e Barbosa (2008). A elevada perda total de P na água de enxurrada foi influenciada pelo tratamento de dose do fertilizante (SFT). Sharpley, et al. (1994) afirmou que aportes contínuos de fertilizantes em doses além das necessidades das culturas promovem acúmulo de P no solo.

Tabela 5: Perdas totais de fósforo nos sedimentos de erosão (PSe) em cada tratamento (Trat) (média das repetições, testes de chuva e diâmetros dos sedimentos) e perdas de fósforo na água de enxurrada nos tratamentos e testes de chuva (T) (média das repetições)

Trat Dose	PSe	Fósforo na água de enxurrada					
		T1	T2	T3	T4	M	DP
kg ha <sup>-1</sup>							
D0	0,071	0,308	0,242	0,171	0,138	0,215	0,08
D200	0,241	26,579	0,481	0,146	0,221	6,857	9,61
D400	0,486	32,137	0,827	0,263	0,140	8,342	11,59
D800	0,426	39,290	1,553	0,539	0,296	10,420	14,11
M	0,306	24,579	0,776	0,279	0,199	6,459	8,84
DP	0,16	14,71	0,49	0,15	0,06	3,82	5,30

M: média. DP: desvio padrão. Fonte: Autora (2022).

O maior valor de perda total de P na água de enxurrada ocorreu na dose mais alta de fertilizante, ou seja, no tratamento D800. No teste 1 de chuva, a perda de P nesse tratamento foi igual a 39,290 kg ha<sup>-1</sup>. No teste 2 a perda foi de apenas 1,553 kg ha<sup>-1</sup>, uma redução de 96% em relação à do teste 1. Nos testes 3 e 4 a referida perda foi respectivamente de 0,539 e 0,296 kg ha<sup>-1</sup>, representando uma redução de 99% e 99,5%, respectivamente, em relação à perda ocorrida no teste 1. Na ausência de SFT, ou seja, no tratamento D0, ocorreu o menor valor de perda total de P na água de enxurrada. Neste tratamento, a perda de P foi de 0,308 kg ha<sup>-1</sup> no teste 1 de chuva, decaindo para o valor de 0,138 kg ha<sup>-1</sup> no teste 4, significando uma redução de 55%.

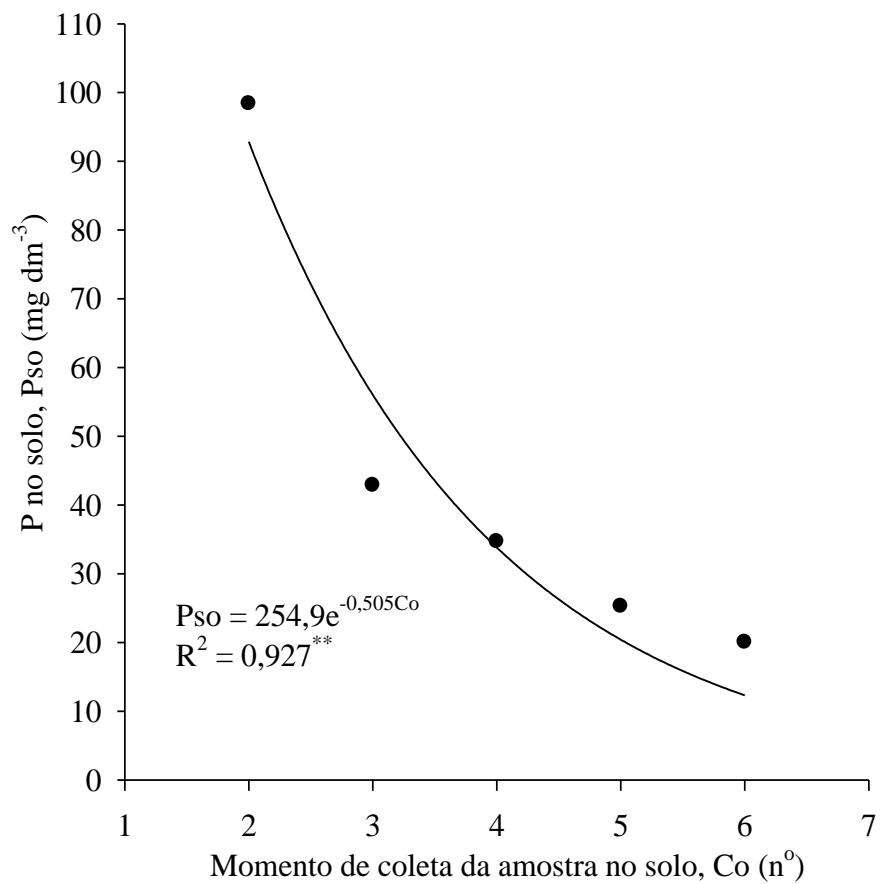
A redução de perda de P na água de enxurrada com o aumento do número de chuvas foi notória em todos os tratamentos (Tabela 5), com maior efeito no tratamento de maior dose de SFT (D800). Essa redução é normal porque a chuva do teste 1 transportou a quase totalidade do elemento via erosão, restando pequena quantidade a ser removida nos testes de chuva subsequentes. Esse comportamento de arraste de P pela água de enxurrada está de acordo como que foi observado por Barbosa et al. (2009) em pesquisa realizada sob chuva simulada.

A perda total de P na enxurrada variou entre um teste de chuva simulada a outro. Os maiores valores ocorreram no teste 1 de chuva com a média dos tratamentos igual a 24,579 kg ha<sup>-1</sup>, decaindo expressivamente no teste 4 de chuva, em que a média dos tratamentos foi de 0,199 kg ha<sup>-1</sup>.

## 6.5. Relação entre variáveis

Na figura 5 é apresentada a relação entre o teor de P na superfície do solo e o momento da coleta de amostra do solo ao longo do período da pesquisa. Na figura o teor de P utilizado foi a média geral da posição superior e inferior na parcela e dos tratamentos estudados. O momento dois (número 2 na abscissa do gráfico) de coleta ocorreu imediatamente após a aplicação do adubo fosfatado (SFT) no solo e o momento seis (número 6 na abscissa do gráfico) ocorreu após a aplicação da 4<sup>a</sup> chuva simulada.

Figura 5. Relação entre o teor de P na camada de 0,025 m de superfície do solo e o momento (numérico: 2, 3, 4, 5 e 6) de coleta da amostra do solo ao longo do período da pesquisa. 2: imediatamente após a adubação; 3: entre a 1<sup>a</sup> e a 2<sup>a</sup> chuva; 4: entre a 2<sup>a</sup> e a 3<sup>a</sup> chuva; 5: entre a 3<sup>a</sup> e a 4<sup>a</sup> chuva; e 6: imediatamente após a 4<sup>a</sup> chuva. (Média das repetições, tratamentos e posições - superior e inferior - na parcela).



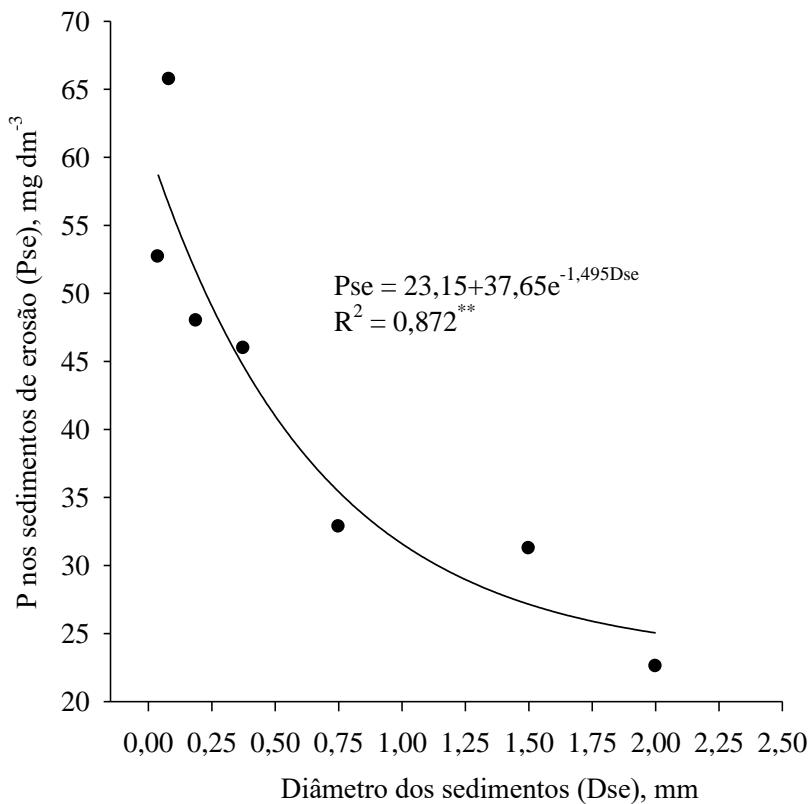
Fonte: Autora (2022).

A relação entre as variáveis foi significativa, com  $R^2 = 0,927$ , significando 93% de confiança no ajuste do modelo aos dados (Figura 5 -  $p \leq 0,01$ ). Portanto, a relação indicou forte decréscimo

do elemento na superfície do solo na medida em que as chuvas simuladas foram aplicadas ao longo do tempo. O maior decréscimo ocorreu entre o momento após a aplicação do adubo e o momento após a 1<sup>a</sup> chuva. Com isso, ficou claro que o arraste do P foi mais intenso no período inicial da pesquisa. A clareza dessa tendência foi notória especialmente no início da 1<sup>a</sup> chuva, de acordo com o que foi verificado também em outros trabalhos (Engel et al., 2009; Gebler et al., 2012a) realizados em condição de solo cultivado. De acordo com o modelo ( $y=ae^{-bx}$ ) que foi ajustado aos dados, o teor de P na superfície do solo decaiu ao longo das coletas de solo. Esse decaimento foi de 41% ocorrido entre a 2<sup>a</sup> coleta realizada após a adubação antes da 1<sup>a</sup> chuva de 87 mm. Entre a 3<sup>a</sup> coleta realizada após essa chuva e a 4<sup>a</sup> coleta realizada após a 2<sup>a</sup> chuva de 84 mm o teor de P no solo decaiu 83%. Na 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> chuva foram aplicados 339 mm de chuva acumuladamente (Tabela 1).

Na figura 6 é apresentada a relação entre o teor de P nos sedimentos de erosão e o diâmetro médio dos sedimentos coletados na enxurrada de cada uma das chuvas simuladas aplicadas. Na figura o teor de P utilizado foi obtido da classe de diâmetro dos sedimentos < 0,038 mm, da média aritmética entre as classes 0,038 e 0,125 mm, entre as classes 0,125 e 0,250 mm, entre 0,250 e 0,500 mm, entre 0,500 e 1,000 mm e entre as classes 1,000 e 2,000 mm e da classe de diâmetro dos sedimentos > 2,000 mm.

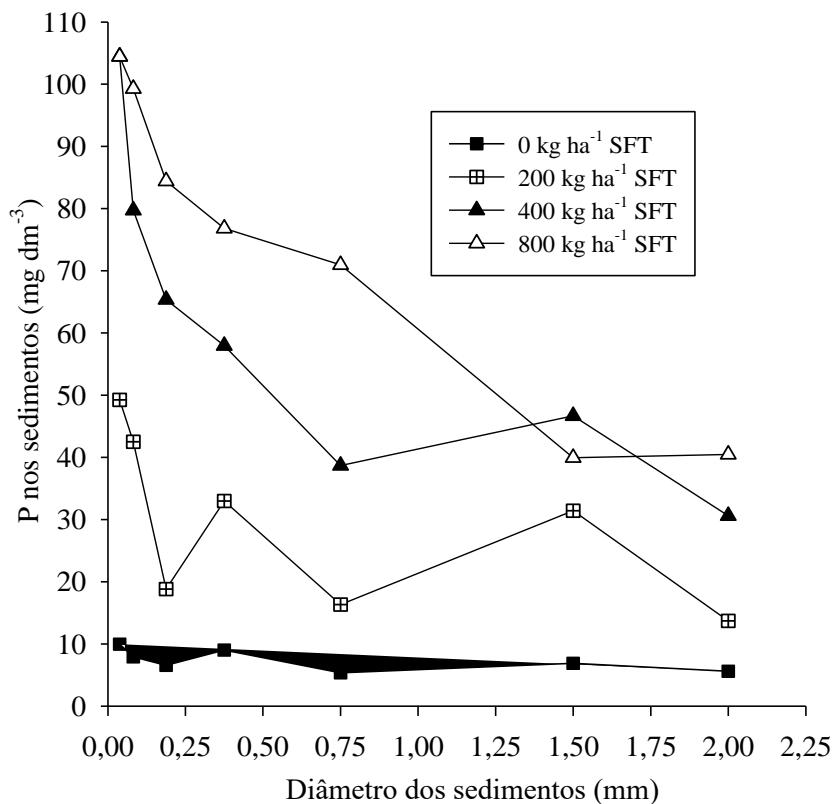
Figura 6. Relação entre o teor de P nos sedimentos e a classe de diâmetro dos sedimentos < 0,038 mm, média entre as classes 0,038 e 0,125 mm, 0,125 e 0,250 mm, 0,250 e 0,500 mm, 0,500 e 1,000 mm e entre as classes 1,000 e 2,000 mm e a classe de diâmetro dos sedimentos > 2,000 mm. (Média das repetições e tratamentos).



Fonte: Autora (2022).

Houve diminuição significativa (Figura 6 -  $p \leq 0,01$ ) do teor de P nos sedimentos em decorrência do aumento de diâmetro médio dos sedimentos perdidos pela erosão. A relação significa que sedimentos de menor diâmetro tiveram maior capacidade de retenção do elemento, ratificando os resultados de outros trabalhos (Lewis & Wurtsbaugh, 2008; Barbosa et al., 2009) em condição de solo cultivado. Em sedimentos com diâmetro de 0,038 mm, por exemplo, o teor de P foi de 59 mg dm<sup>-3</sup>, segundo o modelo exponencial que se ajustou aos dados. Em sedimentos com 2,000 mm por outro lado o teor do elemento foi de 22 mg dm<sup>-3</sup>. Esses resultados são relevantes principalmente do ponto de vista ambiental. A perda de sedimentos de menor diâmetro por erosão significa possibilidade de enriquecimento em P dos locais de possível depósito desses sedimentos. No caso desses sedimentos aportarem águas de superfície, poderão desencadear o enriquecimento da água desses mananciais, com as consequências decorrentes da eutrofização, conforme Sharpley et al. (1981), Sharpley et al. (1987) e Sharpley et al. (1994). Considerando a individualidade dos tratamentos (Figura 7), houve diferenciação entre eles quanto ao decaimento do teor de P nos sedimentos na mediada em que aumentou o diâmetro médio dos sedimentos na enxurrada.

Figura 7. Teor de fósforo nos sedimentos por diâmetro sedimentos e por tratamento: < 0,038 mm, média entre as classes 0,038 e 0,125 mm, 0,125 e 0,250 mm, 0,250 e 0,500 mm, 0,500 e 1,000 mm e entre as classes 1,000 e 2,000 mm e a classe de diâmetro dos sedimentos > 2,000 mm, nos quatro tratamentos de dose de superfosfato triplo (SFT). (Média das repetições).



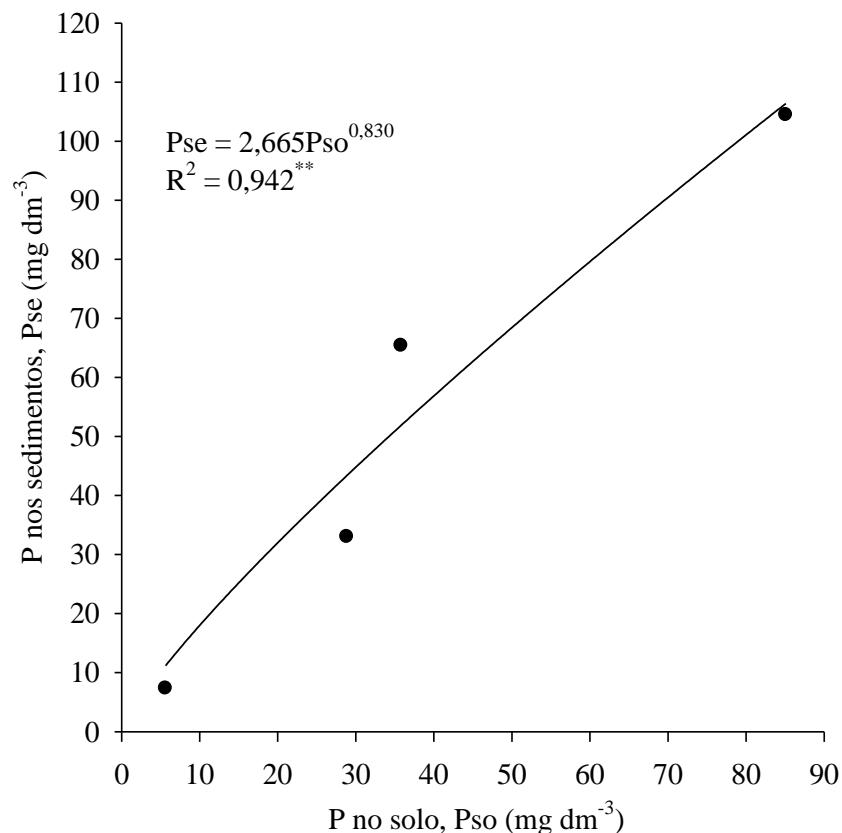
Fonte: Autora (2022).

Nas doses de 400 e 800 Kg ha<sup>-1</sup> de SFT aplicado ao solo, o teor de P foi de 104 mg dm<sup>-3</sup> nos sedimentos < 0,038 mm para ambos os tratamentos (Figura 7). Nos sedimentos com diâmetro > 2,000 mm, por sua vez, o teor do elemento foi de 35 mg dm<sup>-3</sup>, na média desses dois tratamentos. Portanto, o decaimento médio do teor de P na superfície do solo foi de 66% entre as classes extremas de diâmetro dos sedimentos. Na dose de 200 Kg ha<sup>-1</sup> de SFT, por outro lado, o teor de P foi de 49 mg dm<sup>-3</sup> nos sedimentos < 0,038mm e de 14 mg dm<sup>-3</sup> nos sedimentos com diâmetro > 2,000 mm, com decaimento médio de 71% entre as classes extremas de diâmetro dos sedimentos. No tratamento testemunha (0 kg ha<sup>-1</sup> de SFT) os valores de teor do P foram baixos, praticamente sem diferenciação entre os sedimentos.

O comportamento da variável teor de P nos diversos diâmetros de sedimentos presentes na enxurrada de erosão demonstra que quanto maior a quantidade de fertilizante fosfatado aplicado

ao solo mais rapidamente esse teor decresce com o aumento de diâmetro dos sedimentos erodidos (Figura 7). Esses dados foram obtidos em condição de solo descoberto e sem cultivo. No entanto, é possível inferir-se que o mesmo comportamento de decaimento do teor de P na superfície do solo possa ocorrer também em condição de solo cultivado na forma de semeadura direta, por exemplo. Isso se deve ao fato de que nesse sistema de manejo os fertilizantes são adicionados em superfície do solo, sem incorporação ou fracamente incorporados ao solo. O teor de P nos sedimentos de erosão relacionou significativamente ( $p \leq 0,01$ ) com o teor de P na camada de 0-0,025 m do solo. Uma equação do tipo potência ( $y=ax^b$ ) foi ajustada aos dados (Figura 8), conforme verificado por outros autores (Bertol et al., 2014) para condição de cultivo. A alta significância da correlação demonstrada na figura significa que o teor de P nos sedimentos foi dependente quase que completamente do teor de P existente na superfície do solo ( $R^2 = 0,942$ ). Segundo o modelo ajustado, para o teor de P no solo equivalente a 50 mg dm<sup>-3</sup>, por exemplo, o teor nos sedimentos foi equivalente a 69 mg dm<sup>-3</sup>. Isto significa uma taxa de enriquecimento de 1,38, na média dos tratamentos. A taxa de enriquecimento em P é um forte indicativo da capacidade de eutrofização de águas de superfície causada por este elemento, segundo Sharpley et al. (1994), no caso dos sedimentos aportarem essas águas.

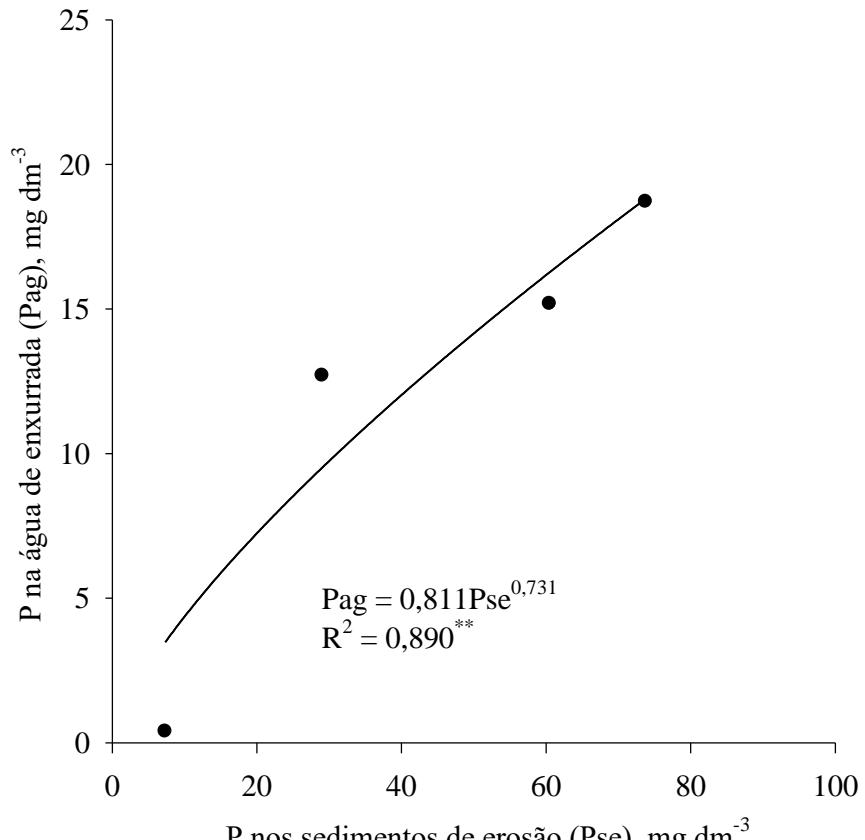
Figura 8. Relação entre o teor de P nos sedimentos e o teor de P no solo na camada de 0-0,025 m (Média das repetições e tratamentos).



Fonte: Autora (2022).

A equação do tipo  $y=ax^b$  ajustou significativamente aos dados ( $p\leq 0,01$ ) na relação do teor de P nos sedimentos com o teor na água de erosão (Figura 9), de acordo com o que foi verificado também por Barbosa et al. (2009). Com base na equação da figura, o teor de P na água de enxurrada seria de  $16 \text{ mg L}^{-1}$  se o teor nos sedimentos fosse de  $60 \text{ mg dm}^{-3}$ . Essa diferença é pequena comparada com a que foi verificada por Sharpley et al. (1981) e Lewis & Wurtsbaugh (2008). Estes autores trabalharam com dados obtidos em condição de cultivo. Os altos teores de P na água nesta pesquisa são explicados pelo fato de se ter trabalhado com solo sem cultivo e descoberto e com altas doses de adubo fosfatado aplicado na superfície do solo. Essa condição favoreceu a máxima perda de água por escoamento superficial e fez com que energia da chuva e enxurrada expresse sua máxima capacidade de desagregar e transportar sedimentos ricos em P.

Figura 9. Relação entre o teor de P na água e o teor de P nos sedimentos de erosão. (Média das repetições e tratamentos).



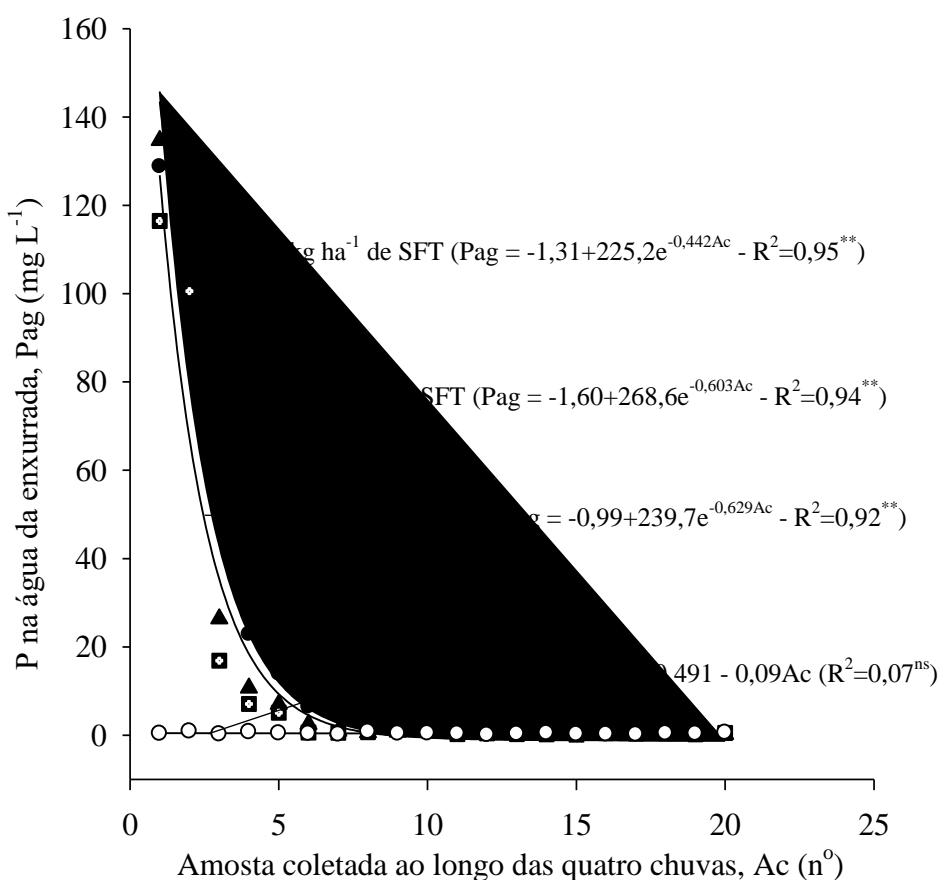
Fonte: Autora (2022).

O teor de P na água de enxurrada decresceu substancialmente ao longo do tempo de duração do escoamento superficial nos três tratamentos com dose de SFT ( $p \leq 0,01$ ), conforme se verifica na figura 10. No tratamento testemunha, sem aplicação de SFT não houve decrescimento dessa variável. Nos três tratamentos com SFT o decrescimento do teor de P na água de enxurrada foi consideravelmente elevado entre a 1<sup>a</sup> amostra de enxurrada coletada (início do escoamento superficial) e o momento em que a 5<sup>a</sup> amostra foi coletada. Esse intervalo do tempo de escoamento durou 25 minutos. Desse momento em diante o teor de P na enxurrada pouco decresceu e rapidamente tendeu a estabilizar até o final do escoamento (final da chuva).

Os momentos iniciais do escoamento superficial são preocupantes do ponto de vista de transporte de P solúvel na água, especialmente em condição de doses elevadas de fertilizantes aplicados ao solo (Figura 10). Na pesquisa observou-se teores de P solúvel na água de enxurrada

da ordem de 120 a 130 mg L<sup>-1</sup> na 1<sup>a</sup> amostra coletada, no início da enxurrada. Esses valores decresceram a aproximadamente 15 a 20 mg L<sup>-1</sup> na 5<sup>a</sup> amostra, aos 25 minutos após o início da enxurrada. Assim, nas áreas agrícolas em escala de lavouras é necessário ter extremo cuidado na aplicação de fertilizantes fosfatados em relação à possível ocorrência imediata de chuvas torrenciais. Os valores do teor de P solúvel encontrados na água de escoamento superficial na presente pesquisa são substancialmente mais elevados do que o valor crítico de 0,01 mg L<sup>-1</sup> sugerido por Vollenweider (1971).

Figura 10. Teor de P na água de enxurrada em diversos momentos ao longo do tempo de duração do escoamento superficial, nos quatro tratamentos de dose superfosfato triplo (SFT). Amostras de 1 a 5: 1<sup>a</sup> chuva. Amostras de 6 a 10: 2<sup>a</sup> chuva. Amostras de 11 a 15: 3<sup>a</sup> chuva. Amostras de 16 a 20: 4<sup>a</sup> chuva. (Média das repetições).

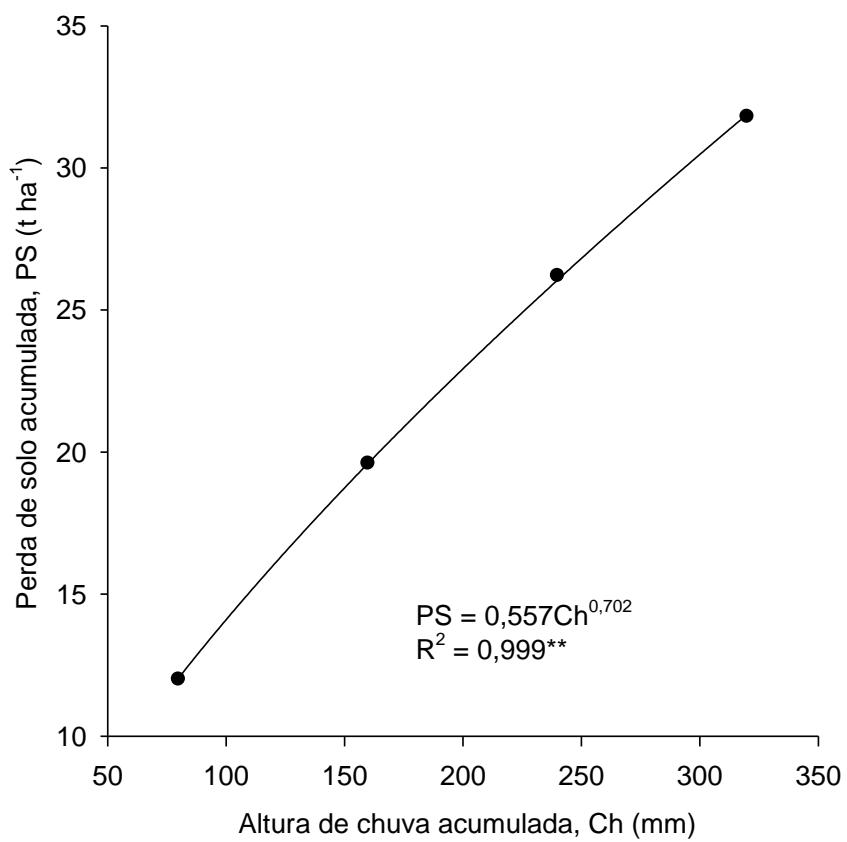


Fonte: Autora (2022).

Quanto a relação entre a perda acumulada de solo e a altura acumulada de chuva ao longo do tempo da pesquisa (Figura 11), nota-se expressivo aumento na perda de solo com o aumento da

chuva acumulada. Esse padrão está presente em todos os testes de chuva. Esses dados corroboram com Mermut et al. (1997), pois segundo ele, o aumento de quantidade de solo perdido por erosão tem relação com o aumento de volume da chuva. Assim, quanto maior a precipitação mais solo será perdido nessas condições, concordando com Eltz et al. (2001) e Oliveira et al. (2010). Em Souza (2016), houve variação entre a altura de chuva acumulada e a perda de solo, devido aos diferentes tipos de cultivo empregados nos tratamentos, nos solos sem resíduo cultural ou cultivo, houve uma menor perda de solo comparado aos tratamentos sem nenhuma influência de cobertura vegetal.

Figura 11. Relação entre a perda acumulada de solo e a altura acumulada de chuva ao longo do tempo de aplicação dos quatro testes de chuva simulada. (Média dos tratamentos).



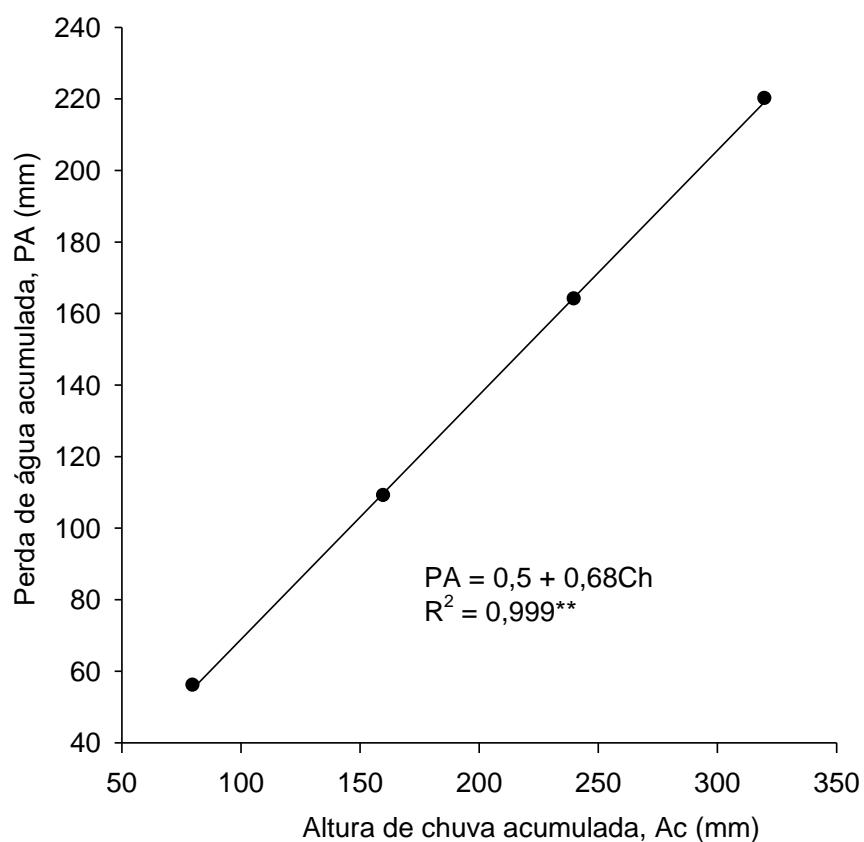
Fonte: Autora (2022).

A relação entre a perda acumulada de água e a altura acumulada de chuva ao longo do tempo de aplicação dos testes de chuva simulada está apresentada na Figura 12. Houve aumento na perda de água acumulada com o aumento da chuva acumulada. O aumento da perda acumulada de água por enxurrada teve influenciada pelo aumento da altura de chuva.

Isso confirma que o escoamento superficial é altamente associado a infiltração de água no solo, a qual é dependente da compactação da camada superficial do solo, dentre outros fatores. Essas variáveis são características do solo que regulam a infiltração de água, de acordo com Brandão et al. (2009) e Lorenzon et al. (2015) e, por sua vez, influenciam a enxurrada.

As estações do ano também podem influenciar a relação entre essas duas variáveis, devido a condições como umidade solo e taxa de evaporação que aumenta ou diminui a infiltração de água e consequentemente o escoamento, segundo Bagio (2016). O teor de água no solo no período antecedente às chuvas é um dos principais fatores determinantes da variação de infiltração de água no solo e, por conseguinte, do escoamento superficial e das perdas de solo por erosão hídrica, de acordo com Istok & Boersma (1986). Conforme verificado por Bertol et al. (2014), quanto maior a altura de chuva, maior o risco de erosão hídrica devido ao aumento de enxurrada.

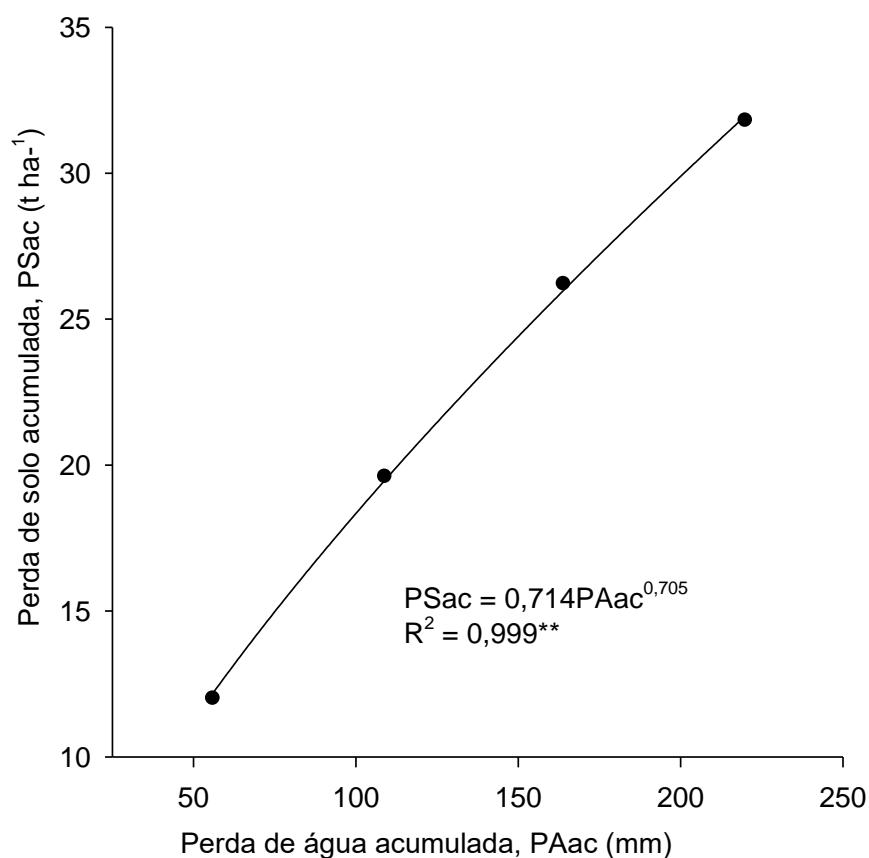
Figura 12. Relação entre a perda acumulada de água e a altura acumulada de chuva ao longo do tempo de aplicação dos quatro testes de chuva simulada. (Média dos tratamentos).



Fonte: Autora (2022).

A elevada significância da correlação demonstrada na figura 13 mostra que a perda acumulada de solo foi dependente quase que completamente da perda acumulada de água por escoamento superficial ao longo do tempo de aplicação dos quatro testes de chuva simulada ( $R^2 = 0,999^{**}$ ). A perda acumulada de solo refletiu de forma mais acentuada as diferenças existentes entre os padrões de precipitação do que a perda acumulada de água. Beutler et al. (2003) e Cogo et al. (2003), verificaram que a perda de solo é mais afetada pelo sistema de preparo e cultivo do que a perda de água. Isso é devido ao limite de infiltração de água no solo que limita a perda de água por escoamento superficial. Por outro lado, a perda de solo é limitada apenas pela erosividade da chuva e enxurrada a ela associada. Devido a isso, solo sem cultivo e descoberto, como foi o caso desta pesquisa, apresenta maior escoamento superficial do que poderia ocorrer em condição de solo cultivado e coberto por resíduos culturais, conforme visto em Schick et al. (2014).

Figura 13. Relação entre a perda acumulada de solo e a perda acumulada de água por escoamento superficial ao longo do tempo de aplicação dos quatro testes de chuva simulada. (Média dos tratamentos).



Fonte: Autora (2022).

## 6. CONCLUSÕES

A aplicação de superfosfato triplo na superfície de solo sem cultivo e descoberto exige cuidados de controle do escoamento superficial, pois o fósforo acumula na superfície e o transporte do elemento pela erosão hídrica aumenta com o aumento de dose do adubo.

O transporte do fósforo pela erosão hídrica é seletivo de acordo com o diâmetro dos sedimentos, ou seja, o teor do elemento é maior nos sedimentos de menor diâmetro do que nos maiores, sendo expressivamente alto naqueles com diâmetro < 0,038 mm.

O teor de fósforo encontrado nos diversos diâmetros de sedimentos é 1,289 vezes maior do que o teor existente no solo, significando alto o potencial de enriquecimento (28,9%) no local de depósito da erosão; isso pode gerar eutrofização se os sedimentos depositarem em corpos d'água; esse fenômeno aumenta com a diminuição de diâmetro dos sedimentos.

O teor de fósforo na água de enxurrada é baixo comparado ao teor nos sedimentos e no solo; considerando a condição sem aplicação fertilizante, o teor de fósforo na água equivale a apenas 5% do teor encontrado nos sedimentos de erosão e em relação à superfície do solo a equivalência é de apenas 3%.

O potencial de perda de fósforo por erosão hídrica diminui com o aumento do período que separa o momento de aplicação do adubo no solo e o de ocorrência da chuva, em solo sem cultivo e descoberto; na primeira chuva após a aplicação do adubo, em especial, a perda de fósforo é expressivamente maior no momento de início da enxurrada do que nos momentos subsequentes.

## 7. REFERÊNCIAS

- ANDERSON, C. J.; LOCKABY, B. G. Research Gaps Related to Forest Management and stream sediment in the United States. *Environ. Manage.* V. 47, pg. 303-313, 2011.
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G., Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* 22, 711-728. 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- BAGIO, B. Erosão hídrica em diferentes comprimentos de declive em solo descoberto. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 96 p. 2016.
- BARBOSA, F. T. Erosão hídrica em três formas de semeadura de aveia e ervilhaca em um Cambissolo Húmico: perdas de nutrientes e carbono orgânico. (Dissertação de mestrado). Lages, UDESC, 75 p, 2008.
- BARBOSA, F.T.; BERTOL, I.; LUCIANO, R.V.; PAZ GONZÁLEZ, A. & VIDAL VÁZQUEZ, E. Teor de nitrogênio solúvel na água de erosão hídrica sob três formas de semeadura de aveia e ervilhaca. *R. Bras. Ci. Solo*, R. Bras. Ci. Solo, 33:439-446, 2009.
- BARBOSA, F.T.; BERTOL, I.; LUCIANO, R.V. & PAZ GONZALEZ, A. Phosphorus losses in water and sediments in runoff of the water erosion in oat and vetch crops seed in contour and downhill. *Soil & Tillage Research*, 106: 22-28, 2009.
- BARBOSA, F.T.; BERTOL, I.; WOLSCHICK, N.H. & VIDAL VÁZQUEZ, E. The effects of previous crop residue, sowing direction and slope length on phosphorus losses from eroded sediments under no-tillage. *Soil & Tillage Research*, 206: 104780-104788, 2021.
- BANDEIRA, D. H., I. BERTOL, E. V. VÁZQUEZ, J. C. RAMOS, C. BERTOL, Impact of pig slurry application on soil and water losses: Comparison with a historical series. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V. 23, p. 425-431, 2019.
- BENNETT, H.H. Soil Conservation; first edition. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York and London, 993p. 1939.
- BERTOL, I. Relações da erosão hídrica com métodos de preparo do solo, na ausência e presença de cobertura vegetal por resíduo cultural de trigo. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre (RS), UFRGS, p. 158, 1986.
- BERTOL, I. Perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo sob rotação de culturas. Universidade & Desenvolvimento, Florianópolis, 2(3):174-184, 1994.
- BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Cobertura morta e métodos de preparo do solo na erosão em solo com crosta superficial. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 13:373-379, 1989.

- BERTOL, I. & MIQUELLUTI, D.J. Perdas de solo, água e nutrientes reduzidas pela cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 28(10):1205-1213, 1993.
- BERTOL, I. Comprimento crítico de declive para preparamos conservacionistas de solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 185p. (Tese de Doutorado), 1995.
- BERTOL et al .Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um inceptisol sob chuva natural. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* vol.28 no.3 Viçosa, 2004.
- BERTOL, O. et al. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 31, p. 781- 792, 2007.
- BERTOL, I.; ENGEL, F.L.; MAFRA, A.L.; BERTOL, O.J. & RITTER, S.R. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Science Direct*, 94:142-150, 2007.
- BERTOL, I.; BERTOL, C.; BARBOSA, F.T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidráulicamente: fabricação e calibração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.6, p.1905-1910, 2012.
- BERTOL, I. Barbosa, F. T.; MAFRA, A. L. FLORES, M. C. Soil water erosion under different cultivation Systems and different fertilization rates and Forms over 10 years. *R. Bras. Ci. Solo*, 38:1918-1928, 2014.
- BERTOL, I., DE MARIA, I.C., SILVA SOUZA, L. Manejo e Conservação do Solo e da Água. Viçosa, MG: SBCS, 1355p. 2019. ISBN978-85-86504-25-9.
- BERTONI, J.; LOMBARDI, N. F. Conservação do solo. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 5.ed. São Paulo: Ícone, p. 355 2005.
- BEUTLER, J.F.; BERTOL, I.; VEIGA, M.; WILDNER, L. P. Perdas de solo e água num Latossolo Vermelho aluminoférreo submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, p.509-517, 2003.
- BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F. etal. Infiltração da água no solo. 3 ed.Viçosa: UFV, 120 p. 2009.
- BROWN, R. K.; AUST, W. M.; MCGUIRE, K. J. Sediment delivery from bare and graveled forest road stream crossing approaches in the Virginia Piedmont. *Forest Ecology and Management*, v. 310, p. 836–846, 2013.
- BROWN, V.; TONDELLO BARBOSA, F.; BERTOL, I.; MAFRA, Á. L.; MONTEIRO MUZEKA, L. Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. p, 13, v. (1). ISSN: 1981-1160, 2018.
- CARDOSO, C.O.; ULLMANN, M.N. & BERTOL, I. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e Campos Novos (SC). *R. Bras. Ci. Solo*, 22:131- 140, 1998.
- CASTRO, O.M. de; LOMBARDI NETO, F.; QUAGGIO, J.A.; MARIA, I.C. de; VIEIRA, S.R. & DECEN, S.C.F. Perdas por erosão de nutrientes vegetais na sucessão soja/trigo em diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 10: 293-297, 1986.
- CASSOL, E.A.; LEVIEN, R.; ANGHINONI, I. & BADELUCCI, M.P. Perdas de nutrientes por erosão em diferentes métodos de melhoramento de pastagem nativa no Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:705-712, 2002.
- COGO, N.P. Effect of residue cover, tillage-induced roughness, and slope lenght on erosion and related parametrs. West Lafayette, Indiana, Purdue University, p. 346, 1981.
- COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C. & FOSTER, G.R. 1984. Soil loss reduction from conservation tillage practices. *Soil Science Society American Journal*, Madison, 48(2):368, 1984.

- COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:743-753, 2003.
- DECOREGIO, H.M.; SAMPIETRO, J.A.; BERTOL, I.; URIO, C.; SOUZA, F.L. & SEQUINATTO, L. Eficiência de diferentes dispositivos em sistemas de drenagem para reduzir a erosão hídrica em estradas florestais revestidas com cascalho. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 47, n. 122, p. 192-202, 2019.
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 28:145-201, 1947.
- ELTZ, F. L. F. MEHL, H. U.; REICHERT, J. M. Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro padrões de chuva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2001.
- ENGEL, F.L.; BERTOL, I.; RITER, S.R.; PAZ GONZÁLEZ, A.; PAZ-FERREIRO, J. & VIDAL VÁZQUEZ, E. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil. *Soil & Till. Res.*, 103:216-221, 2009.
- FATMA - FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA. Instrução Normativa 11 versão outubro/2014. Disponível em: <<http://www.fatma.sc.gov.br>>. Acesso em: 20/11/2014.
- GUADAGNIN, J.C. Perdas de nutrientes e carbono orgânico pela erosão hídrica, em um Cambissolo Húmico Alumínico léptico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo. (Tese de Mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 150p. 2003.
- GUADAGNIN et al. Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 29, p. 277-286, 2005.
- GEBLER, L.; FIALHO, F. B. Introduzindo critérios de risco em modelos de contaminação pontual para locais de carga de agrotóxicos. *Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, Curitiba, v. 21, p. 85-94, 2011.
- GEBLER, L.; BERTOL, I. RAMOS, R. R.; LOUZADA, J. A. S.; MIQUELLUTI, D. J. Fósforo reativo: Arraste superficial sob chuvas simuladas para diferentes coberturas vegetais. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 16 (1), 2012.
- GEBLER, L.; LOUZADA, J. A. S.; BERTOL, I. RAMOS, E. E.; MIQUELLUTI, D. J.; SCRAMMEL, B. M. Adaptação metodológica no cálculo de cargas contaminantes de fósforo em bacias hidrográficas gaúchas. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.16, n.7, p.769–776, 2012.
- HART, S. L.; MILSTEIN, M. B. Criando valor sustentável. *Revista de Administração de Empresas*, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 65-79, maio/jul. 2004.
- HOWARTH, R. W.; JENSEN, H. S.; MARINO, R. POSTMA, H. Transport to and processing of P in nearshore and oceanic Waters. In: Tiessen, H. Ed., *Phosphorus in the Global Environment*, Wiley, New York, p. 323-328, 1995.
- HUDSON, N.W. Soil conservation: second edition. Cornell University Press. Ithaca. New York, p. 324, 1981.
- ISTOK, J. D.; BOERSMA, L. Effect of antecedent rainfall on runoff during low-intensity rainfall. *Journal of Hydrology*, 1986.
- KOHNKE, H. Soil physics. New York, McGraw-Hill, 224p, 1968.
- LACERDA, J. J. J.; RESENDE, A. V.; NETO, A. E. F.; HICKMANN, C.; CONCEIÇÃO, O. P. Fertilization, grain yield and profitability of the rotation between soybean and corn in soil with improved fertility. *Pesq. agropec. bras.* 50 (09), 2015.
- LANGDALE, G.W.; LEONARD, R.A. & THOMAS, A.W. Conservation practice effects on phosphorus losses from Southern Piedmont watersheds. *J. Soil Water Conserv.*, 40:157-160, 1985.

- LEITE, D. et al. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. I - Perdas de solo e água. R. Bras. Ci. Solo, v. 28, p. 1033-1044, 2004.
- LEWIS, W. M.; WURTSBAUGH, W. A. Controle do fitoplâncton lacustre por nutrientes: erosão do paradigma do fósforo. 2018.
- LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; TONELLO, K. C. Escoamento superficial da água da chuva em um fragmento florestal de mata atlântica, Viçosa-MG. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS), v.5, n.1., p.50-58, Julho, 2015.
- MARTINS FILHO, MARCÍLIO V. et al. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar . Eng. Agríc. [conectados]. vol.29, n.1, pp.8-18, 2009.
- McISAAC, G. F.; MITCHELL, J.. K.; HIRSCHI, M. C. Dissolved phosphorus concentrations in runoff from simulated rainfall on corn and soybean tillage, Journal of Soil and Water Conservation, 50, 4, 383-388, 1995.
- MELLO, E.L. Erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo sob chuva simulada. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 88p, 2002.
- MERMUT, A. R.; LUK, S. H.; ROMKENS, M. J. M.; POESEN, J. W. A. Perda de solo por respingo e lavagem durante a chuva de dois solos loess. Geodema, 1997.
- MIRÁS AVALOS, J.M.; SANDE FOUZ, P.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ GONZÁLEZ, A.; BERTOL, I. Crop residue effects on organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and loads in runoff water. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.40, p.200-213, 2009.
- NEUWALD, O. Atributos físicos e hídricos do solo e produtividade da soja em sistema integrado lavourapecuária em Nitossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo. Lages, 2005. 91p.
- NORTON, E.A. Soil Conservation Survey Handbook. Washington, USDA, 40p. (Miscelaneous Publication, 532), 1939.
- OLIVEIRA, J. R. de. Perdas de solo, água e nutrientes em um argissolo vermelho-amarelo sob diferentes padrões de chuva simulada. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2007.
- OLIVEIRA, J. R.; PINTO, M. F.; SOUZA, W. J.; GUERRA, J. M. G.; CARVALHO. D. F. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.14, n.2, p.140–147, 2010.
- PANACHUKI, Elói. Infiltração De Água No Solo E Erosão Hídrica, Sob Chuva Simulada, Em Sistema De Integração Agriculturapecuária. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pósgraduação em Agronomia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, 2003.
- PINHEIRO, D. T. C.; COSTA, C. C.; MOTTA, L. L.; GODINHO. F. C.; SILVA, F. V. Monitoramento da fertilidade do solo submetido à erosão hídrica em área cultivada com Eucalyptus sp. em São João Evangelista – MG. REVISTA AGROGEOAMBIENTAL, p. 1-9, 2010.
- RAMOS, J. C. Influência das condições de superfície e do cultivo do solo na erosão hídrica em um Cambissolo Húmico. R. Bras. Ci. Solo, v. 38, p. 1587-1600, 2014.
- ROBERTS, W. M.; GONZALEZ-JIMENEZ, J. L.; DOODY, D. G.; JORDÂNIA, P.; DALY, K. Assessing the risk of phosphorus transfer to high ecological status rivers: Integration of nutrient management with soil geochemical and hydrological conditions. Science of the Total Environment, v.589, p.25-35, 2017.
- SÁ, J. C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema de plantio direto. Castro: Fundação ABC, p. 94, 1993.

- SANTOS, G. S.; NORI, P. G. OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, p.115-123, 2010.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. Sistema brasileiro de classificação dos solos, 2018.
- SANTOS, V. P. Erosão hídrica no cultivo da cebola. UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina. Dissertação, p. 108, 2019.
- SCHAEFER, C. E. R.; SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; ALBUQUERQUE, M. A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, p.669-678, 2002.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT JÚNIOR, A.A. & BATISTELA, O. Erosão hídrica em cambissolo húmico álico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo – II: perdas de nutrientes. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, 24:437-447, 2000.
- SCHICK, J.; BERTOL, I. COGO, N. P.; GONZÁLEZ, P. A. Erosividade das chuvas de Lages, Santa Catarina. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 38, núm. 6, noviembre-diciembre, pp. 1890-1905, 2014.
- SHARPLEY, A. N.; AHUJA, L. R.; MENZEL, R. G. The Release of Soil Phosphorus to Runoff in Relation to the Kinetics of Desorption. Journal of environmental quality 1981 v.10 no.3 Find all articles in: Journal of environmental quality, v.10 no.3, pp. 386-391, 1981.
- SHARPLEY, A. N.; SMITH, S. J.; NANNEY, J. W. Environmental impact of agricultural nitrogen and phosphorus use. Agricultural And Food Chemistry, 35, 5, 812-817, 1987.
- SHARPLEY, A. N. Estimating phosphorus in agricultural runoff available to several algae iron-oxide paper strips. Journal of Environmental Quality, Madison, v. 22, p. 678-680, 1993.
- SHARPLEY, A. N.; CHAPRA, S. C.; WEDEPOHL, R.; SIMS, J. T.; DANIEL, T. C.; REDDY, K. R. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. Journal of Environmental Quality, v.23, p.437-451, 1994.
- SHARPLEY, A. N. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff. Journal of Environmental Quality, Madison, v. 24, p. 947-951, 1995.
- SHARPLEY, A. N. Managing agricultural phosphorus to minimize water quality impacts. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.) 73 (1), 2016.
- SWANSON, N.P. A rotating-boom rainfall simulator. Transactions of the ASABE, Saint Joseph, v. 26, p. 1738-1743. 1965.
- SOUZA, G. B. de. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente com palha de cana-de-açúcar. xi, 62 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011.
- SOUZA, V. F. C. Erosão hídrica influenciada pelo uso da terra e manejo do solo. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 115p. 2016.
- TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, UFGRS, p. 94, 1995. (Boletim Técnico, 5)
- VALENTIN, F. A. S., Análise do Controle, Recuperação e Prevenção da Erosão Hídrica no Parque Cesamar em Palmas-TO. Centro Universitário Luterano de Palmas, ULBRA. 2018.
- VANWALLEGHEM, T.; GÓMEZ, J. A.; AMATE, J. I.; MOLINA, M. G. de; VANDERLINDEN, K.; GUZMÁN, G.; LAGUNA, A.; GIRÁLDEZ, J. V. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. Antropocene, v. 17, p. 13-29, 2017.
- VOLLENWEIDER, R.A. OECD, Technical Report. Paris, France, 1971.

WREGE, M.S.; STEINMETZ, S.; REISSER JR, C.; ALMEIDA, I.R. Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 336 p. 2011.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, 1978.