

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**PERDAS DE ÁGUA POR ESCOAMENTO
SUPERFICIAL DE UM SOLO COM DIFERENTES
NÍVEIS DE RESÍDUOS VEGETAIS E DECLIVIDADES
DO TERRENO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Cleiton Dalla Santa

**Santa Maria, RS, Brasil
2010**

**PERDAS DE ÁGUA POR ESCOAMENTO
SUPERFICIAL DE UM SOLO COM DIFERENTES
NÍVEIS DE RESÍDUOS VEGETAIS E DECLIVIDADES
DO TERRENO**

Por

Cleiton Dalla Santa

Dissertação apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

Orientador: Reimar Carlesso

Santa Maria, RS, Brasil

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

PERDAS DE ÁGUA POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE UM SOLO
COM DIFERENTES NÍVEIS DE RESÍDUOS VEGETAIS E
DECLIVIDADES DO TERRENO

elaborada por
Cleiton Dalla Santa

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Ph. D. Reimar Carlesso
(Presidente/Orientador)

Prof. Ph. D. Flávio Luiz Foletto Eltz (UFSM)

Dr^a. Tatiana Tasquetto Fiorin (IFF– Alegrete)

Santa Maria, 26 de fevereiro de 2010.

Aos meus pais Pedrinho e Celina Dalla Santa
DEDICO este trabalho

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita, ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar este curso.

À CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Reimar Carlesso pela orientação, incentivo e principalmente pela presença amiga.

Aos meus pais Pedrinho e Celina Dalla Santa, pelo apoio, incentivo e compreensão aos muitos momentos em que estive longe, muito obrigado!

A minha namorada Vandriza Penteado da Silva, pelo amor, incentivo e compreensão as longas ausências.

À Zanandra B. de Oliveira e Renato Spohr, pela valiosa ajuda na realização deste trabalho.

Aos colegas e amigos do Sistema Irriga: Brantan Chagas, Mirta Petry, Alberto Eduardo Knies, Rodrigo Elesbão, Juliano Martins, Cleudson Michelon, Gisele Saldanha, Gustavo de David, Luis Fernando Grasel, Vinícius Dubou, Tiago Broetto, Geraldo Rodrigues, Rodrigo Mulazzani, Carlos Henrique Grasel, Luis Felipe Severo, Juliano Uebel. Obrigado pelo companheirismo e ajuda.

E à todos aqueles que torceram e contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

PERDAS DE ÁGUA POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE UM SOLO COM DIFERENTES NÍVEIS DE RESÍDUOS VEGETAIS E DECLIVIDADES DO TERRENO

Autor: Cleiton Dalla Santa
Orientador: Reimar Carlesso
Santa Maria, 26 de fevereiro de 2010.

A conservação da água e do solo constitui um aspecto de grande relevância para uma produção agrícola mais sustentável, assim, a busca de tecnologias e informações que contribuam para um adequado manejo do solo e o uso da água se faz cada vez mais necessária. O objetivo desse trabalho foi determinar e modelar as perdas de água por escoamento superficial, de um solo com diferentes níveis de resíduos vegetais na superfície e declividades do terreno, a partir de chuvas simuladas. O trabalho foi desenvolvido em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da UFSM, em quatro locais, os quais possuíam declividades de zero, 2,5, 5 e 8%, respectivamente. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três níveis de resíduos vegetais de aveia na superfície do solo (0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹) em três repetições. As parcelas experimentais de 0,5m² foram delimitadas por chapas metálicas galvanizadas cravadas no solo contendo na parte inferior uma calha coletora, para coletar a água do escoamento superficial (mensurado em intervalos de cinco minutos). A intensidade de precipitação de 30, 80 e 120 mm h⁻¹ foram aplicadas utilizando um simulador de chuvas de bicos múltiplos e oscilantes, fazendo duas simulações (chuva 1 e 2, aplicados alternadamente, a cada dia) em cada declividade para cada intensidade.

. Em cada intensidade de chuva simulada simulação foi determinado o tempo de início e a taxa de escoamento superficial, além da chuva (quantidade, duração e intensidade), umidade inicial e de saturação do solo. Utilizou-se o modelo modificado de Smith para estimativa do escoamento superficial. Os parâmetros do modelo foram ajustados através de equações multivariadas. Na chuva 1, intensidade de 30 mm h⁻¹ não houve escoamento superficial na declividade zero, nas demais declividades, o escoamento superficial representou 1,0, 8,8 e 11,5%, da quantidade

de chuva aplicada. Nas chuvas de intensidades de 80 e 120 mm h⁻¹, as perdas de água por escoamento superficial representaram em média 59 e 53% da quantidade de chuva aplicada, respectivamente. Na chuva 2, as perdas de água por escoamento superficial representaram 33, 45 e 73%, da quantidade aplicada, respectivamente, para as intensidades de 30, 80 e 120 mm h⁻¹. A presença de resíduo vegetal na superfície retarda o início do escoamento superficial e reduz a taxa de escoamento superficial constante, para diferentes intensidades de chuva (30, 80 e 120 mm h⁻¹) e declividades do terreno (zero, 2,5, 5 e 8%). As equações multivariadas geradas a partir das características da chuva e do teor de umidade no solo apresentaram boa precisão na estimativa da taxa de escoamento superficial constante e o tempo de início do escoamento superficial.

Palavras-chave: intensidade de chuva; perdas de água; modelos de estimativas.

ABSTRACT

Dissertation of Master
Post-Graduation Program on Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria

WATER LOSSES THROUGH SURFACE RUNOFF OF A SOIL WITH DIFFERENT LEVELS OF CROP RESIDUE AND SLOPE STEEPNESS

Author: Cleiton Dalla Santa
Advisor: Reimar Carlesso
Santa Maria, February 26, 2010.

The search for information and technology that can contribute for an adequate management of soil and water utilization has been in an increasing need, as their conservation is of great matter for a sustainable agriculture. The goal of the present work was determining and modelling the water losses through surface runoff, of a soil with different levels of crop residue and declivity, using simulated rainfall. The work was conducted inside an area for experiments of the Departamento de Engenharia Rural da UFSM, in four locations, which had slope of zero, 2.5, 5 e 8%, respectively. The design of the experiment was completely randomized, with three levels of crop residue of oat in the surface (0, 2.5 e 5 Mg ha⁻¹) in three replicates. The parcels of the experiment of 0.5 m² were delimited using galvanized metal sheets implanted in the soil with a gutter at the bottom, to collect the water of the surface runoff (measuring in 5 minutes intervals). The rainfall intensities of 30, 80 and 120 mm h⁻¹ were applied using a rainfall simulator of multiple and oscillating nozzles, doing two simulations (Rainfall 1 and 2, applied alternately each day) in each slope for each intensity.

For each simulated rainfall it was determined the starting time and the runoff rate, besides rain (amount, duration and intensity), initial humidity and soil saturation. For estimating the surface runoff, it was used the modified Smith model. The model parameters were adjusted through multivariate equations. In the Rainfall 1, with intensity of 30 mm h⁻¹ there was no runoff for the zero slope, and for the remaining slopes, the runoff represented 1.0, 8.8 e 11.5% of the amount of rain applied. In the rainfalls with intensity of 80 and 120 mm h⁻¹, the water losses through surface runoff

represented about 59 and 53% of the amount of rain applied, respectively. In Rainfall 2, the water losses through surface runoff represented 33, 45 e 73%, of the amount applied, respectively, for the intensities of 30, 80 and 120 mm h⁻¹. The presence of crop residue delays the start of surface runoff and reduces the surface runoff rate, for different rain intensities (30, 80 e 120 mm h⁻¹) and slope steepness (zero, 2.5, 5 and 8%). The multivariate equations generated from the rain characteristics and soil humidity showed good precision in estimating the surface runoff rate and the starting time of the runoff.

Keywords: rainfall intensity; water losses; estimation models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Detalhe das parcelas, calhas coletoras e pluviômetros utilizados nas avaliações das chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2010.....	29
Figura 2 - Detalhe do simulador de chuva estacionário de bicos múltiplos e oscilantes utilizado nas aplicações das chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2010.....	30
Figura 3- Intensidade da chuva em função do número de oscilações dos bicos aspersores para calibração do simulador de precipitação e o CUC para cada teste. Santa Maria, RS, 2007.	300
Figura 4- Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para a chuva de 30 mm h ⁻¹ . Santa Maria, RS, 2010.....	44
Figura 5- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo na declividade de 2,5% e intensidade de chuva de 30 mm h ⁻¹ . Santa Maria, RS, 2010.....	44
Figura 6- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e intensidade de chuva de 30 mm h ⁻¹ (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.....	45
Figura 7- Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e estimada pelo modelo de Smith (B), para a chuva de 80 mm h ⁻¹ em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.....	46
Figura 8- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith para uma chuva de 80 mm h ⁻¹ , para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.....	47
Figura 9 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 80 mm h ⁻¹ em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.....	48
Figura 10 - Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para uma chuva de 120 mm h ⁻¹ . Santa Maria, RS... ..	49

- Figura 11 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 120 mm h^{-1} em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.....50
- Figura 12 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 120 mm h^{-1} em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.....51
- Figura 13- Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para uma chuva de 30 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.....53
- Figura 14- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 30 mm h^{-1} em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.....54
- Figura 15- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 30 mm h^{-1} em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.....55
- Figura 16- Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para uma chuva de 80 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.....56
- Figura 17- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 80 mm h^{-1} em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.....57
- Figura 18- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 80 mm h^{-1} em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.....58
- Figura 19- Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para uma chuva de 120 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.....59
- Figura 20- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 120 mm h^{-1} em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.....60

- Figura 21- Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 120 mm h^{-1} em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.....61
- Figura 22- Escoamento superficial acumulado, (símbolos) valores obtidos a campo, (linhas) valores ajustados pelo modelo de Smith para uma chuva de 120 mm h^{-1} (Chuva 1), em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.....63
- Figura 23- Relação entre o escoamento superficial acumulado observado e o estimado pelo modelo de Smith (Chuva 1), para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo, sob uma intensidade de chuva de 120 mm h^{-1} (A) declividade 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.....64
- Figura 24- Relação entre o escoamento superficial acumulado observado e o estimado pelo modelo de Smith (Chuva 2), para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo, sob uma intensidade de chuva de 120 mm h^{-1} (A) declividade 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.....65
- Figura 25- Escoamento superficial acumulado, (Símbolos) valores obtidos a campo, (linhas) valores ajustados pelo modelo de Smith para uma chuva de 120 mm h^{-1} (Chuva 2), em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.....66
- Figura 26 – Relação entre o escoamento superficial acumulado observado e o estimado pelo modelo de Smith (Chuva 2), para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e uma intensidade de chuva de 120 mm h^{-1} (A) declividade 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.....67
- Figura 27- Relação entre o escoamento superficial acumulado observado e o estimado pelo modelo de Smith (Chuva 2), para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e uma intensidade de chuva de 120 mm h^{-1} (A) declividade 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.....68
- Figura 28- Coeficiente de escoamento superficial em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno, para uma chuva de 30 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.....69
- Figura 29- Coeficiente de escoamento superficial em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno, para uma chuva de 80 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.....70
- Figura 30- Coeficiente de escoamento superficial em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno, para uma chuva de 120 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.....71
- Figura 31- Comparação entre os valores observados e estimados (equação 6) da taxa de escoamento superficial constante. Santa Maria, RS, 2010.....75

Figura 32- Comparação entre os valores observados e estimados (equação 7) do tempo de início do escoamento superficial. Santa Maria, RS, 2010.....76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores médios da densidade de partículas e do solo, porosidade (total, macro e micro) e textura (argila, silte e areia) do solo em que foi realizado o experimento, em diferentes declividades. Santa Maria, RS, 2010.....	34
Tabela 2- Valores médios de chuva (duração, intensidade e quantidade) em função da chuva programada (30, 80 e 120 mm h ⁻¹) e escoamento superficial nas diferentes declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.....	36
Tabela 3- Valores de intensidade da chuva e umidade do solo (antes da simulação e de saturação) nas diferentes declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.....	39
Tabela 4- Valores médios da taxa de escoamento constante e início do escoamento, para 0, 3 e 6 Mg ha ⁻¹ em diferentes declividades do terreno para as intensidades de chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2010.....	40
Tabela 5- Valores máximos, mínimos, desvio padrão e médias das variáveis utilizadas para o conjunto de dados (216) obtidos para diferentes intensidades de chuvas simuladas e quantidades de resíduo vegetal na superfície do solo, para quatro declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.....	73
Tabela 6- Equação de regressão linear múltipla para estimativa da taxa de escoamento superficial constante. Santa Maria, RS, 2010.....	74
Tabela 7- Equação de regressão linear múltipla para estimativa do tempo de início do escoamento superficial. Santa Maria, RS, 2010.....	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Chuva efetiva	18
2.2 Infiltração de água no solo	20
2.3 Resíduos vegetais na superfície do solo e sistemas de cultivo.....	22
2.4 Declividade do terreno e intensidade da chuva.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Características físicas do solo.....	34
4.2 Intensidade, duração e quantidade de chuva e perdas de água por escoamento superficial.	35
4.3 Condições de umidade inicial e do solo	38
4.4 Resíduos vegetais na superfície do solo.....	39
4.6 Taxa de escoamento superficial e escoamento superficial acumulado.....	42
4.7 Coeficiente de escoamento superficial.....	69
4.8 Resumo estatístico das variáveis em estudo	72
4.9 Estimativa de taxa de escoamento superficial constante e do tempo de início do escoamento superficial.....	73
5 CONCLUSÕES.....	78
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A conservação da água e do solo constitui um aspecto de grande relevância para uma produção agrícola mais sustentável, de uma forma especial ao tratar de agricultura irrigada. Assim, a busca de tecnologias e informações que contribuam para um adequado manejo do solo e o uso da água se faz cada vez mais necessária.

O manejo adequado da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto. Um dos problemas clássicos que envolvem esse manejo é a determinação do quanto considerar da chuva ocorrida no balanço hídrico, ou seja, a chuva efetiva. Segundo Silva et al. (1994), em um manejo adequado da irrigação, a quantidade de água a ser aplicada à cultura é a diferença entre a evapotranspiração dos cultivos e a precipitação efetiva.

Dessa forma, a chuva efetiva ou aproveitável é um dos elementos básicos a ser considerado na equação do balanço hídrico, para determinar os requerimentos de irrigação das culturas, ocupando um papel fundamental no planejamento da irrigação, no uso eficiente dos recursos hídricos e no dimensionamento das obras e dos sistemas de irrigação (ROMERO; GRANÃ, 1999).

Os fatores que influenciam na porção efetiva da chuva são todos aqueles que afetam a infiltração e escoamento superficial, tais como: fatores relacionados à precipitação (quantidade, frequência e intensidade), as propriedades físicas do solo, a umidade antecedente no solo; declividade do terreno, rugosidade superficial e percentagem de cobertura do solo, entre outros, esses fatores podem atuar isoladamente ou interagindo com outros.

Para o melhor entendimento e quantificação de processos hidrológicos, a determinação das perdas de água por escoamento superficial pela precipitação natural é essencial. Estudos confiáveis com chuva natural requerem vários anos de medidas para obter uma amostragem representativa dos eventos de chuva. Além disso, a natureza irregular da chuva natural impede a intensiva coleta de dados durante a ocorrência do evento. Assim, para possibilitar estudo em períodos mais curtos e com maior controle das intensidades de precipitação tem-se utilizado chuvas artificiais produzidas por simuladores de chuva (SILVA et al., 2001).

Portanto o presente trabalho teve como objetivo, determinar e modelar as perdas de água por escoamento superficial, de um solo com diferentes níveis de resíduos vegetais na superfície e declividades do terreno a partir de precipitações simuladas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Chuva efetiva

A chuva ou precipitação pluvial é definida em hidrologia como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre (BERTONI; TUCCI, 2001). A chuva efetiva ou aproveitável é um dos elementos básicos a ser considerado na equação do balanço hídrico para determinar os requerimentos de irrigação das culturas, ocupando um papel fundamental no planejamento da irrigação, no uso eficiente dos recursos hídricos e no dimensionamento das obras e dos sistemas de irrigação (ROMERO; GRANÃ, 1999).

No Brasil, os projetos de irrigação são geralmente dimensionados em termos de irrigação total, visando cobrir as necessidades hídricas da planta, não se considerando a contribuição das chuvas. No entanto para fins de manejo, a tendência atual é viabilizar o aproveitamento das chuvas, com a inclusão da chuva efetiva como reduzindo, assim, os custos de operação e manutenção do sistema (SAMPAIO, 2000).

Conforme Dastane (1974), apesar de haver um grande volume de dados sobre o clima, não se conhece o necessário sobre as precipitações pluviais. Alguns conceitos simples são confundidos pelos técnicos da área, como o conceito de chuva efetiva que, no seu sentido mais amplo, significa a chuva útil ou utilizável; entretanto, este conceito varia bastante, de acordo com a área de interesse. Como exemplo, para a prática de irrigação, a chuva efetiva seria a parcela da precipitação total que é utilizada para atender as necessidades da cultura durante seu desenvolvimento.

Segundo Silva et al. (1994), em um manejo adequado da irrigação, a quantidade de água a ser aplicada à cultura é a diferença entre a evapotranspiração da cultura e a chuva efetiva. Assim, a determinação da porção efetiva da chuva com fins de aplicação na agricultura apresenta grande relevância (SAMPAIO, 2000).

Vários fatores influem na porção efetiva da precipitação pluvial total, os quais podem atuar isoladamente ou interagindo com outros. Qualquer fator que afete a

infiltração e/ou escoamento superficial ou a evapotranspiração, tem influência no valor da precipitação pluvial efetiva. SEGUÍ et al. (1995), citam que os fatores determinantes na precipitação pluvial efetiva são os relacionados a chuva (quantidade, frequência e intensidade), as propriedades físicas e a umidade antecedente no solo; a declividade, a cobertura vegetal e a profundidade do sistema radicular.

Quanto maior a porcentagem de cobertura vegetal, a rugosidade da superfície do solo e a evapotranspiração da cultura, maiores serão as taxas de infiltração de água no solo quando ocorrer uma chuva e, conseqüentemente, menores serão as perdas por escoamento superficial. Em contrapartida, quanto maior for a área e a declividade da bacia hidrográfica, maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial que ocorrerá na seção de deságüe. Além disso, quanto mais circular for a forma da bacia hidrográfica, mais rápida será a concentração do escoamento superficial e conseqüentemente, maior deverá ser a sua vazão máxima (PRUSKI et al. 2003)

O declive do terreno é outro fator que influencia fortemente as perdas de solo e água por erosão hídrica, pois à medida que ela aumenta, maiores serão o volume e a velocidade do escoamento superficial e menor será a infiltração de água no solo. Com isso, aumenta a capacidade de transporte das partículas de solo pela enxurrada, assim como a própria capacidade desta de desagregar solo, por ação de cisalhamento, principalmente quando concentrada nos sulcos direcionados no sentido da pendente do terreno (COGO et al., 2003).

Para o entendimento e quantificação de processos hidrológicos, a determinação das perdas de água por escoamento superficial pela chuva natural é essencial. Quando a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração de água de um solo, inicia o acúmulo superficial de água e, ultrapassada a capacidade de acúmulo de água na superfície do terreno, ocorre o escoamento superficial. Para Derpsch et al, (1991), se toda a água da precipitação que atingisse a superfície do solo pudesse infiltrar, não haveria escoamento superficial. Nessas condições, quando a taxa de escoamento superficial praticamente não varia com o tempo passa a ser chamada de taxa constante de escoamento superficial.

Estudos confiáveis com precipitação pluvial requerem vários anos de medidas para obter uma amostragem representativa dos eventos de precipitação. Além disso, a natureza irregular da precipitação natural impede a intensiva coleta de dados

durante a ocorrência do evento. Assim, para possibilitar estudo em períodos mais curtos e com maior controle das intensidades da precipitação tem-se utilizado chuvas artificiais produzidas por simuladores de chuva (SILVA et al., 2001).

2.2 Infiltração de água no solo

Infiltração é o processo pelo qual a água penetra no solo, através de sua superfície (BERNARDO, 2002). É definida como a passagem de água da superfície para o interior do solo, constituindo-se num dos mais importantes processos que compõem o ciclo hidrológico, por ser fator determinante da disponibilização de água para as culturas, da recarga dos aquíferos subterrâneos, da ocorrência e magnitude do escoamento superficial e do manejo do solo e da água (CECÍLIO et al., 2003).

O processo de infiltração de água no solo ocorre porque a água da chuva ou da irrigação possui um potencial total maior do que aquele verificado para a água do solo, sendo este último tão menor quanto mais seco estiver o solo (CARLESSO; ZIMMERMANN, 2000). No início da irrigação ou da chuva, a infiltração de água é rápida, isto ocorre devido ao reduzido potencial total do solo seco e também pela entrada de água pelas rachaduras, canais biológicos e macroporos do solo. A medida que a chuva ou irrigação continua há uma redução na infiltração de água devido o aumento do potencial total da água que passa a ser igual ao gravitacional, tornando a camada superficial do solo praticamente saturada.

O conhecimento do processo de infiltração é de importância prática, pois o mesmo determina o balanço de água na zona das raízes e o deflúvio superficial, responsável pelo fenômeno da erosão durante as chuvas. Desse modo, o conhecimento desse processo e das suas relações com as propriedades do solo é de fundamental importância para o eficiente manejo do solo e da água nos cultivos agrícolas (REICHARDT, 1996).

Para uma adequada determinação das características de infiltração de água no solo, devem ser utilizados métodos que representem esse fenômeno de forma semelhante ao ocorrido naturalmente, uma vez que a taxa de infiltração é muito influenciada pelas condições de superfície e conteúdo de umidade do solo (PRUSKI et al., 1997).

Segundo Pott; De Maria (2003), vários fatores condicionam o movimento de água no solo, os quais têm sido estudados por diversos autores, a saber: a porosidade (PERROUX; WHITE, 1988; EVERTS; KANWAR, 1992), a densidade do solo (SALES et al., 1999), a cobertura do solo (ROTH et al., 1985; SIDIRAS; ROTH, 1987), a textura e o grau de agregação do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990), o selamento superficial (REICHERT et al., 1992; CHAVES et al., 1993), a umidade inicial (ARAÚJO FILHO; RIBEIRO, 1996), a matéria orgânica, a estrutura e a variabilidade espacial do terreno (KLAR, 1984).

O processo de infiltração é influenciado pelo conteúdo inicial de água do solo, condutividade hidráulica e características da camada superficial do solo, além de ser afetada também pela presença de camadas de baixa permeabilidade e duração da precipitação ou irrigação (BERNARDO, 2002; CARLESSO; ZIMMERMANN, 2000). As principais características físicas que afetam a taxa de infiltração de água no solo são as estruturas, as texturas, as porosidades e as tamanhas dos poros do solo. Além disso, fendas e rachaduras, presença de ar aprisionado, porcentagem de matéria orgânica e a temperatura do solo e da água também influenciam a infiltração da água no solo (DAKER, 1984).

De acordo com Carduro Dorfman (1988), condições tais como: porosidade, umidade, atividade biológica, cobertura vegetal, rugosidade superficial e declividade do terreno, dentre outras, influem grandemente na infiltração da água no solo. Segundo Reichert et al. (1992), a textura do solo afeta o salpico de partículas provocado pelo impacto das gotas de precipitação, contribuindo para uma redução da porosidade da camada superficial do solo. Além do impacto da gota, Morin; Van Winkel (1996) citam a dispersão físico-química das argilas do solo como causa da formação do selamento superficial e, conseqüentemente, da redução da taxa de infiltração.

De acordo com Ankeny et al. (1994), a infiltração de água no solo está diretamente relacionada com a estrutura do solo e sua estabilidade, densidade do solo, porosidade do solo, selamento superficial, cobertura do solo e carbono orgânico (SINGH et al., 1994). A presença de macroporos contínuos, como os poros construídos por minhocas e outros organismos, aumenta a infiltração de água no solo (OKA, 1988). A quantidade e a maneira como os poros estão distribuídos no solo afetam diretamente a infiltração de água no solo (ELTZ et al; 1989). A distribuição do tamanho de poros que está diretamente relacionada a textura e

estrutura do solo afeta a capacidade de armazenamento e o movimento da água no solo (HILLEL, 1980).

Solos de textura grossa, ou seja, arenosos, possuem maior quantidade de macroporos que os de textura fina e, conseqüentemente, apresentam maior condutividade hidráulica e taxa de infiltração. Entretanto, os solos argilosos bem estruturados, ou com estrutura estável, podem mostrar maiores taxas de infiltração do que os com estrutura instável, que sofrem dispersão quando umedecidos ou submetidos a algum agente desagregador.

A textura e a estrutura são características que influenciam expressivamente a movimentação da água no solo, uma vez que determinam a quantidade de macroporos presentes em seu perfil, os quais são de extrema importância na condutividade hidráulica do solo, também interferem expressivamente na infiltração a forma dos poros e a sua continuidade.

2.3 Resíduos vegetais na superfície do solo e sistemas de cultivo

O impacto das gotas de precipitação sobre o solo promove pode ocasionar a fragmentação dos agregados e a formação do encrostamento superficial, o qual contribui para a redução da capacidade de infiltração do solo. Esta redução contribui para o aumento do escoamento superficial, que constitui o principal agente de transporte de partículas do solo. Por isso, o manejo do solo tem grande influência no processo erosivo, pois, durante preparos e cultivos intensivos, pode ocorrer um distúrbio maior na estrutura do solo, causando desagregação das camadas superficiais e, ou compactação subsuperficial, o que facilita a erosão (SANTOS et al., 1997).

Dessa forma, a utilização de sistemas de cultivo conservacionistas, como o sistema plantio direto (SPD), que determinam a manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo e o seu mínimo revolvimento, causam redução nas perdas por erosão, diminuição na amplitude térmica do solo, retenção de maior quantidade de água e maiores rendimentos dos cultivos agrícolas, além de diminuir a evaporação de água e o escoamento superficial, elevando a taxa de infiltração (BRAGAGNOLO; MIELNICZUCK, 1990). A grande maioria dos trabalhos relata a

contribuição do sistema de plantio direto na redução das perdas de solo e pouca ênfase tem sido dada as perdas de água por escoamento superficial nesse sistema de cultivo.

A cobertura do solo apresenta efeito importante na erosão, os resíduos vegetais na superfície do solo interceptam as gotas de precipitação e dissipam a sua energia, evitando a desagregação das partículas e a formação de selamento superficial. Além disso, há redução na velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, redução na sua capacidade de desagregação e transporte de partículas do solo (MANNERING; MEYER, 1963; FOSTER, 1982). Segundo Owoputi; Stolte (1995) a desagregação do solo é causada por forças aplicadas às partículas do solo por agentes que são, principalmente, as gotas de precipitação e o escoamento superficial, e a predominância de um ou de outro fator no desprendimento e transporte dos sedimentos depende da forma como ocorre a erosão.

Dessa forma, um fator muito importante na taxa de infiltração é a cobertura vegetal que está no solo durante a precipitação. Segundo Young; Wiersma (1973), a cobertura do solo proporcionada pelos resíduos culturais deixados, diminui cerca de 90%, a desagregação das partículas de solo e o selamento superficial, aumentando a infiltração de água (PRUSKI, 1997). Os resíduos vegetais atuam ainda na redução da velocidade do escoamento superficial devido ao aumento da rugosidade hidráulica do percurso da água, o que reduz a capacidade erosiva da enxurrada (SLONEKER; MOLDENHAUER, 1977; COGO, 1981; PRUSKI, 1997), podendo reduzir a perda de solo em até 90% (YOUNG; WIERSMA, 1973).

Analisando as perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, Silva et al. (2005), para diferentes porcentagens de cobertura do solo, encontraram redução de 99% nas perdas de solo para um percentual de cobertura de 88%, Castro et al. (2006), encontraram 80% de perda de água nas parcelas sem cobertura vegetal em relação às com cobertura. A porcentagem de cobertura do solo proporcionada pelas restevras das culturas é fator fundamental na redução das perdas de solo por erosão hídrica (SLONEKER; MOLDENHAUER, 1977), obtendo-se boa eficácia já com 30% de cobertura (COGO, 1981; LOPES et al., 1987) mas, quanto mais protegida pela cobertura vegetal estiver a superfície do solo, maior será a resistência do solo a ocorrência de erosão e, menor será o escoamento superficial, conseqüentemente maior a infiltração de água no solo.

O manejo do solo altera a taxa de infiltração de água, por isso solos sob plantio direto, apresentam um aumento da taxa de infiltração de água, quando comparado ao preparo convencional, isso ocorre devido à presença no sistema plantio direto, de uma rede de macroporos contínuos em profundidade (SILVA, 2003; BARCELOS et al., 1999). No sistema de preparo convencional, Barcelos et al, (1999) verificaram que a taxa de infiltração de água foi 18% inferior àquela observada no sistema plantio direto, tendo como conseqüências um maior escoamento superficial, e maiores riscos de perda de solo e nutrientes por erosão.

A presença de restos culturais na superfície do solo, independentemente do manejo adotado, proporciona redução de perda de solo, enquanto que a perda de água é mais afetada pela forma de manejo dos resíduos do que pela porcentagem de cobertura morta sob o solo (CARVALHO et al.,1990). Segundo Bertol et al. (1997), um manejo com 60% de cobertura do solo promoveu uma redução de 80% nas perdas de solo em relação ao manejo com ausência de cobertura.

Analisando a perda de solo por erosão, West et al. (1991) constataram redução de 70% na perda de solo por erosão em entre sulcos no sistema sem preparo do solo em relação aos submetidos ao preparo convencional. Essa diferença foi atribuída ao teor de carbono orgânico e agregados estáveis em água, em maior quantidade no sistema sem preparo do solo.

O efeito protetor da cobertura do solo por resíduos vegetais é melhor evidenciado nos períodos em que o solo é mobilizado, mesmo que em pouca extensão, como ocorre na operação de semeadura denominada sem preparo do solo ou semeadura direta. Com cobertura parcial, a superfície do solo fica menos protegida da ação conjunta das gotas da precipitação e da enxurrada a ela associada, e, quando isso coincide com períodos de precipitação de elevada erosividade, os riscos de erosão aumentam.

Kertzmann (1996) verificou que, sob sistema plantio direto, o solo apresenta redução da taxa de infiltração quando comparado a condição natural do mesmo. Segundo Zimmermann (2001) isso pode estar relacionado a influências negativas das propriedades físicas do solo neste sistema de plantio, aumentando assim a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração de raízes e, diminuindo a infiltração de água no solo. O intensivo tráfego de máquinas e equipamentos, associado ao não-revolvimento do solo, usualmente ocasiona a compactação da

camada superficial do solo, alterando a magnitude do conteúdo de água (TORMENA et al., 1998).

Michelon (2005) avaliando a compactação em solos irrigados do RS observou que 66,5% das áreas irrigadas do Rio Grande do Sul, na faixa de 40 – 50% de teor de argila, apresentavam indicação de compactação na camada superficial. Alves; Suzuki (2004) observaram que a compactação tem sido constatada na camada superficial no sistema plantio direto e em alguns locais reduz a produtividade das culturas (Letey, 1985).

A compactação do solo limita a infiltração de água, ocasionando erosão ou empoçamento da água na superfície do solo (SILVA, 2003). De acordo com Reinert et al. (2001), a textura do solo é uma característica pouco variável no tempo e pouco afetada pelo manejo. Dessa forma, as modificações físicas dos solos são associadas à sua estrutura. Ainda, segundo os autores, em sistemas irrigados de produção agropecuária parte das limitações impostas pela degradação da estrutura dos solos associados ao uso agrícola, podem ser aliviadas pelo manejo do conteúdo de água do solo. Por outro lado, o manejo inadequado da água, pode gerar limitações de falta de ar para as plantas, pela aplicação de água em excesso, ou acelerar a compactação pelo intenso tráfego de máquinas, em solos úmidos, devido a maior susceptibilidade dos mesmos à compactação.

A ocorrência de uma camada de menor permeabilidade a água no perfil do solo limita a capacidade de infiltração deste, apresentando capacidade de infiltração igual a permeabilidade da camada limitante. Essa camada de impedimento poderá ser tanto arenosa como argilosa, dependendo da condição inicial de umidade do solo. Uma camada argilosa limita a infiltração em condições de saturação do solo enquanto uma camada arenosa limita a infiltração em condições não saturadas do perfil (CARLESSO; ZIMMERMANN, 2000).

A menor eficácia da semeadura direta no controle da perda de água, comparada à perda de solo, deve-se ao fato de que, independentemente do tipo de preparo utilizado, o solo apresenta capacidade finita de infiltração de água, a partir da qual a taxa de enxurrada tende a se igualar nos diferentes tipos de preparo. Por outro lado, a técnica de semeadura direta tem proporcionado acúmulo de nutrientes na superfície do solo, pela não-inversão da sua camada arável, o que favorece a concentração de nutrientes na enxurrada (SCHICK et al., 2000). A erosão hídrica, por ser seletiva, preferencialmente transporta os sedimentos mais finos, de menor

diâmetro e de baixa densidade, constituídos, sobretudo de colóides minerais e orgânicos e normalmente enriquecidos de elementos minerais (BERTOL et al., 2007).

Ao trabalhar com precipitações naturais em um Cambissolo Húmico Distrófico, Bertol (1994) verificou que as perdas de água são muito menos influenciadas pelo preparo do solo do que as perdas de solo. Segundo Bertol et al. (2001), práticas diferenciadas de manejo do solo e de cultivos provocam alterações nas propriedades físicas do solo que podem manifestar-se de várias maneiras, influenciando o desenvolvimento das plantas.

Em decorrência disso, observa-se uma diminuição da taxa de infiltração de água no solo, com conseqüente aumento das taxas de escoamento superficial. Em geral, o preparo convencional altera mais acentuadamente as condições físicas do solo, pela desagregação superficial. Esse sistema favorece, quando da incidência de precipitação, o aparecimento de crosta superficial e a compactação subsuperficial, diminuindo a infiltração de água e facilitando o processo erosivo.

SILVA et al. (2005) trabalhando com de seis porcentagens de cobertura (0, 20, 40, 60, 80 e 100), quatro intensidades (60, 80, 100 e 120 mm h⁻¹) e quatro durações de chuva simulada (68, 40, 24 e 14 minutos) observaram que o aumento da porcentagem de cobertura do solo, para as intensidades de precipitação utilizadas, diminui as perdas de água por escoamento superficial.

Pesquisando sobre a infiltração de água em solo cultivado sob diferentes sistemas de manejo e rotação de culturas, Alves Sobrinho et al. (2003) utilizando infiltrômetro de aspersão calibrado para aplicar uma intensidade de precipitação de 60 mm h⁻¹ estimaram, para as áreas de plantio direto nas sucessões soja-nabo, soja-aveia, soja-pousio e área de plantio convencional, valores de taxa de infiltração estável, respectivamente iguais a 31,5; 45,1; 22,6; e 14,50 mm h⁻¹. Já Silva (2003) trabalhando em condições semelhantes e no mesmo local, encontrou taxa de infiltração nas áreas de plantio convencional com ervilhaca de 25,7 mm h⁻¹ e nas em pousio 13,9 mm h⁻¹, enquanto que nas áreas de plantio direto com ervilhaca obteve 28,7 mm h⁻¹ e em pousio 27,2 mm h⁻¹, evidenciando maiores valores de taxa de infiltração estável nas áreas de plantio direto.

LOMBARDI NETO et al. (1988) quantificaram o efeito de 0, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 4000 e 8000 Kg ha⁻¹ de massa seca de resíduos de milho sobre as perdas de água e solo de um Latossolo roxo distrófico. Os autores concluíram que, o

aumento da quantidade de resíduos diminuiu acentuadamente as perdas de água e solo o nível de cobertura de 2000 Kg ha⁻¹ reduziu em 50% as perdas de solo e em 40% as de água, em relação ao tratamento descoberto. Os autores justificaram que, a cobertura de resíduos vegetais tem menor efeito sobre o fluxo de água, no entanto, diminui o volume e a velocidade do escoamento superficial, devido ao menor selamento superficial, e ao aumento da rugosidade do terreno, aumentando a infiltração e diminuindo as perdas de água.

2.4 Declividade do terreno e intensidade da chuva

A topografia do terreno, pela declividade e pelo comprimento dos lançantes, exerce acentuada influência sobre a erosão e sobre as perdas de água por escoamento superficial. Quanto maior o declive de um terreno, menores serão os obstáculos e resistências oferecidas ao livre escoamento das águas sob o impulso da gravidade, resultando em um menor tempo disponível para a infiltração das águas no solo (COGO et al., 2003).

Pouca importância tem sido dada ao efeito da declividade da superfície do solo na erosão, sendo prática comum relacionar-se a taxa de erosão para estas áreas, como função do quadrado da intensidade de precipitação (KINNELL; CUMMINGS, 1993). No entanto, Watson; Laflen (1986) constataram que, o aumento da declividade da superfície do solo aumenta a erosão nas áreas entressulcos, embora não seja com o mesmo grau em que ocorre na erosão em sulcos.

Albuquerque et al. (2002) analisando os efeitos do manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas sobre perdas por erosão hídrica de um Luvisolo Crômico Órtico, encontraram redução de 53,4% para o cultivo em nível em relação àquele em desnível.

Quando a declividade da superfície do solo foi aumentada de 2 para 20%, Lattanzi et al. (1974) verificaram que a erosão entressulcos de um solo siltoso aumentou mais que o dobro. Bryan (1979), avaliando 10 tipos de solos em uma faixa de 5 a 58% de declividade, observou que para a maioria dos casos, uma função polinomial de segundo grau representou bem a relação entre erosão entre sulcos e a

declividade da superfície do solo. Lang et al. (1984) encontraram que a erosão em entressulcos de um “topossolo” foi maior para 9% de declividade que em 3%.

As chuvas de elevada intensidade, quando ocorrem em situações em que o solo não está protegido pela cobertura vegetal ou pela cobertura morta, promovem compressão pelo impacto das gotas de chuva, e a infiltração torna-se reduzida; porém, em condições de adequada cobertura superficial, o efeito é amenizado (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

A intensidade da precipitação, tanto para precipitações simuladas quanto naturais, pode estar relacionada com o valor de energia cinética das gotas da chuva, Reichert et al. (1992) consideraram que a energia cinética da precipitação foi a principal medida usada para descrever o potencial da precipitação em causar desestruturação de agregados na superfície e erosão do solo.

Quando a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração do solo (ALBURQUEQUE et al, 2002; KUHN; BRYAN, 2004) inicia o escoamento superficial, pois o impacto das gotas promove compressão e tende a saturar a superfície do solo, causando mudanças na taxas de infiltração. Alves; Cabeda (1999), usando precipitação simulada com duas intensidades avaliando o método de plantio direto e de plantio convencional, concluíram que para o preparo convencional a taxa de infiltração estável foi menor sob a precipitação de maior intensidade. Por outro lado, Meyer; Harmon (1979) evidenciaram que, precipitações artificiais de mesma intensidade e duração de 30 minutos produziram perdas de solo cerca de três vezes menores quando a energia cinética da precipitação foi reduzida em torno de 57%.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, RS, no ano de 2008. A área está situada em latitude de 29°41'24"S e longitude de 53°48'42"W. O clima da região, conforme Moreno (1961), é do tipo "Cfa" de acordo com a classificação climática de Köppen (subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes), A precipitação média anual da região varia de 1322 a 1769 mm. O solo do local está classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (EMBRAPA, 1999).

O experimento foi conduzido nos meses de outubro e novembro de 2008, em quatro locais, com declividades de 0, 2,5, 5 e 8%, respectivamente. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três níveis de resíduos vegetais de aveia (*Avena strigosa* Schreb) na superfície do solo (0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹) em três repetições

Em cada declividade foram delimitadas nove parcelas experimentais de 1 x 0,5 (0,5 m²) com chapas metálicas galvanizadas cravadas no solo, contendo na parte inferior uma calha, para coletar a água de escoamento superficial (figura 1), totalizando 36 parcelas. A cultura de aveia foi cultivada nos meses antecedente a realização do experimento, sendo dessecada e a parte área arrancada antes da instalação das parcelas experimentais, após, foi quantificada e distribuída conforme os tratamentos.



Figura 1 - Detalhe das parcelas, calhas coletoras e pluviômetros utilizados nas avaliações das chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2010.

As chuvas simuladas foram aplicadas utilizando-se um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes desenvolvido pelo National Soil Erosion Research Lab, USDA-ARS, USA (figura 2).



Figura 2 - Detalhe do simulador de chuva estacionário de bicos múltiplos e oscilantes utilizado nas aplicações das chuvas simuladas. Santa Maria, RS.2010.

Utilizou-se a curva de calibração obtida por Spohr (2007) trabalhando com esse mesmo equipamento (Figura 3). O simulador foi instalado a 2,45 metros acima da superfície do solo e a pressão de saída da água dos bicos foi mantida em 41,4 KPa. As intensidades de chuvas aplicadas foram de 30, 80 e 120 mm h⁻¹.

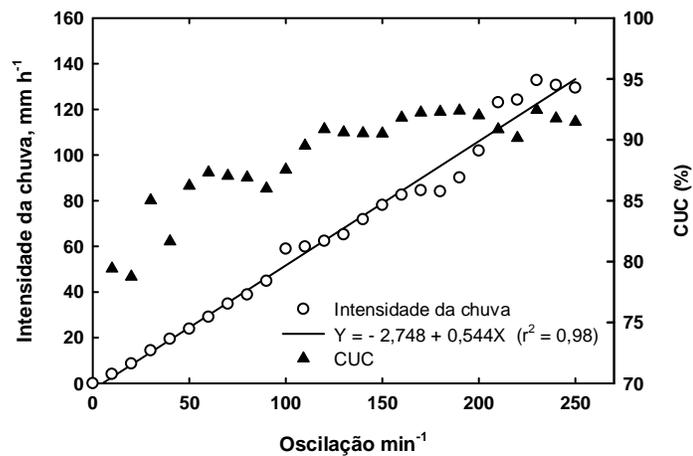


Figura 3 - Intensidade da chuva em função do número de oscilações dos bicos aspersores para calibração do simulador de precipitação e o CUC para cada teste. Santa Maria, RS, 2007.

Para cada intensidade de chuva simulada, realizou-se dois ensaios por declividade, o primeiro foi considerado como chuva 1 e após 24 horas realizava-se um segundo, que foi considerado como chuva 2. A aplicação da mesma intensidade de chuva foi no mesmo dia, nas quatro declividades.

O tempo início de escoamento superficial foi determinado quando um filete contínuo de água começava a escoar na calha coletora e a superfície apresentava encharcamento. As coletas do volume escoado foram realizadas em intervalos de cinco minutos utilizando recipientes graduados, até o escoamento tornar-se constante, caso contrário utilizava-se o tempo máximo de 120 minutos para cada precipitação simulada. A precipitação total foi determinada através de pluviômetros instalados na superfície do solo, ao lado das calhas coletoras (Figura 1).

A umidade inicial do solo, antes da aplicação de cada precipitação simulada, foi determinada coletando-se amostras de solo deformadas da camada superficial do solo (0 a 10 cm). A determinação da umidade gravimétrica foi realizada utilizando-se metodologia descrita por Bernardo (2002) e os valores foram convertidos para umidade volumétrica.

Em uma área adjacente ao local da instalação do simulador de chuvas foram coletadas amostras de solo para a determinação de umidade inicial e final. A coleta para a caracterização físico hídrica foi realizada no meio das parcelas após o término de todas as chuvas simuladas. Coletaram-se amostras na camada de 0 a 10 cm, com estrutura preservada para as determinações de macroporosidade, microporosidade, porosidade total, curva característica de água no solo e densidade do solo, e amostras com estrutura deformada para as análises granulométrica e densidade de partículas as quais foram realizadas no Laboratório de Análises físicas do Sistema Irriga (Departamento de Engenharia Rural – UFSM)

Determinou-se a umidade de saturação e o teor de água retido no potencial de $-0,006$ MPa, obtido em mesa de tensão. Este valor foi utilizado como sendo a microporosidade desse solo. A porosidade total (Pt) foi calculada a partir da densidade do solo (Ds) e densidade de partículas (Dp), através da expressão $Pt = (Dp - Ds) / Dp$, e, a macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

As determinações analíticas de densidade de partículas, densidade e porosidade do solo foram realizadas conforme métodos descritos pela Embrapa (1979). Para a análise granulométrica utilizou-se o método da pipeta (GEE;

BAUDER, 1986). A densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico, utilizando um cilindro de metal de 65 cm³ de volume.

O modelo matemático usado para descrever o escoamento superficial do solo foi o descrito por Smith (1972), citado por ALVES; CABEDA, (1999), que descreve a infiltração de água no solo:

$$i = (R - i_c) \times \left(\frac{t_p - t_0}{t} \right)^b + i_c, \text{ para } t > t_p \quad (1)$$

Cabeda (1980), citado por ALVES; CABEDA (1999) modificou o numerador da expressão “ $\left(\frac{t_p - t_0}{t} \right)^b$ ” para “ $\left(\frac{t_e}{t} \right)^b$ ” obtendo:

$$i = (R - i_c) \times \left(\frac{t_e}{t} \right)^b + i_c, \text{ para } t > t_e \quad (2)$$

Onde: i é a taxa de infiltração em um tempo t (mm h⁻¹); R é a intensidade constante de chuva (mm h⁻¹); i_c é a taxa constante de infiltração (mm h⁻¹); t_0 é a assintótica vertical paralela ao eixo y , no gráfico de uma curva que descreve o processo de infiltração, sendo $0 \leq t_0 \leq t_p$; t_p é o tempo de empoçamento da água sobre o solo (minutos); t_e é o tempo de início de escoamento da água sobre a superfície do solo (minutos); t é o tempo após o início do escoamento (minutos) e b é o parâmetro de ajuste do modelo,

Como a infiltração de água no solo e o escoamento superficial são processos antagônicos, ou seja, o aumento dos valores de um causa a redução dos valores do outro em igual magnitude (sob intensidade constante de chuva), realizou-se as seguintes modificações no modelo de Smith: (i) substituindo-se o termo “ $R - i_c$ ” pela taxa constante de escoamento (e_c) em mm h⁻¹; (ii) subtraindo-se 1 do resultado da expressão “ $\left(\frac{t_e}{t} \right)^b$ ” e; (iii) excluindo-se o termo “ $+ i_c$ ” na equação 2, obteve-se:

$$e = e_c \times \left\{ 1 - \left(\frac{t_e}{t} \right)^b \right\}, \text{ para } t > t_e \quad (3)$$

Onde e é a taxa de escoamento superficial em um tempo t (mm h^{-1}); e_c (mm h^{-1}) taxa constante de escoamento t_e é o tempo de início de escoamento da água sobre a superfície do solo (minutos); t é o tempo após o início do escoamento (minutos) e b é o parâmetro de ajuste do modelo,

O escoamento superficial acumulado (e_a) foi obtido através da integração da taxa de escoamento superficial em função do tempo:

$$e_a(t) = \int_0^t e(t)dt \quad (4)$$

Foram realizadas análises de regressão linear múltiplas estimando-se os parâmetros da equação 3 (e_c , t_e , b) para as variáveis independentes incluídas no modelo usando a opção “stepwise” do SAS, em nível de 5% de significância. As variáveis utilizadas nessa opção foram: chuva (quantidade, duração e intensidade), declividade do terreno, massa seca na superfície umidade inicial e umidade final do solo.

Na definição das equações de regressão linear múltiplas para predizer os parâmetros do modelo foi estabelecido que o comportamento de uma característica na equação deve afetar o parâmetro a ser predito (variável dependente) de forma consistente com o conhecimento empírico e teórico do processo. A eficácia das funções foram avaliadas pelo coeficiente de determinação (r^2) e graficamente pela relação 1:1 dos dados estimados versus os observados,

Os dados de taxa constante e tempo de início de escoamento superficial foram analisados estatisticamente através do programa Statistical Analysis System (SAS), sendo a análise de variância determinada em nível de 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características físicas do solo

Na tabela 1 são apresentados os valores médios de densidade de partículas e do solo, porosidade (total, macro e micro) e textura (argila, silte e areia) para a camada superficial (0 a 10 cm) nas quatro declividades do terreno. Os valores de textura foram os mesmos, pelo fato de ser o mesmo tipo de solo e classe textural (franco arenosa). A densidade de partículas apresentou valor médio de $2,5 \text{ g cm}^{-3}$. Para a macroporosidade o valor mais baixo foi de 5,74% e o mais alto de 7,58%, para as declividades de zero e 2,5%, respectivamente, variando em função da densidade do solo.

Tabela 1 - Valores da densidade de partículas e do solo, porosidade (total, macro e micro) e textura (argila, silte e areia) do solo em que foi realizado o experimento, em diferentes declividades. Santa Maria, RS, 2010.

Declividade (%)	Densidade (g cm^{-3})		Porosidade (%)			Textura (%)		
	Solo	Partículas	Macro	Micro	Total	Argila	Silte	Areia
0	1,50	2,5	5,74	34,26	40,00	19,3	26,7	54,1
2,5	1,42	2,5	7,58	35,62	43,20	19,3	26,7	54,1
5	1,42	2,5	7,17	36,03	43,20	19,3	26,7	54,1
8	1,41	2,5	6,89	36,71	43,60	19,3	26,7	54,1

O aumento da densidade do solo resultou na diminuição da porosidade total, afetando diretamente a macroporosidade do solo, pois os macroporos são diminuídos, e aumenta o percentual de microporos. No entanto, os valores de densidade do solo variaram de 1,41 a $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ estando abaixo do limite crítico considerado por Reichert et al. (2003), de 1,70 a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ para os franco-solo arenosos. Essa redução da macroporosidade do solo traz como consequência uma

redução na infiltração inicial bem como na capacidade de infiltração do solo (CARLESSO; ZIMMERMANN, 2000).

4.2 Intensidade, duração e quantidade de chuva e perdas de água por escoamento superficial.

Na tabela 2 são apresentados os valores médios de escoamento superficial e das chuvas (duração, intensidade e quantidade) para as chuvas simuladas nas quatro declividades do terreno. Observa-se que a intensidade da precipitação aplicada não correspondeu à chuva programada devido à ocorrência de rajadas de vento e de pequenas variações na pressão nos bicos do simulador durante a aplicação das mesmas, alterando assim, a quantidade total de água aplicada nas diferentes simulações.

Na chuva 1 (tabela 2), para as aplicações com intensidade de 30 mm h^{-1} não houve escoamento superficial para declividade do terreno zero, nas demais declividades, as perdas de água por escoamento superficial representaram, 1,0, 8,8 e 11,5%, respectivamente, da quantidade de chuva aplicada, 60,0, 50,0 e 52,0 mm. h^{-1} . Nas chuvas simuladas de 80 mm h^{-1} o escoamento superficial representou 44,6, 56,5, 69,9 e 64,9%, respectivamente, da quantidade total aplicada 82,9, 47,5, 68,5 e 50,0 mm . Na intensidade de 120 mm h^{-1} o escoamento superficial foi de 34,4, 51,7, 62,5 e 65,4%, respectivamente, da quantidade aplicada de 123,0, 138,7, 124,0 e 112,5 mm .

Tabela 2 - Valores de chuva (duração, intensidade e quantidade) em função da chuva programada (30, 80 e 120 mm h⁻¹) e escoamento superficial nas diferentes declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.

Declividade do terreno (%)	Duração da chuva (min)	Intensidade da chuva (mm h ⁻¹)	Quantidade da chuva (mm)	Escoamento superficial (mm)
Chuva 1				
0	95	29	45,9	0,0
2,5	120	30	60,0	0,6
5	120	25	50,0	4,4
8	120	26	52,0	6,0
0	120	93	186,0	82,9
2,5	60	84	84,0	47,5
5	60	98	98,0	68,5
8	55	84	77,0	50,0
0	60	123	123,0	42,3
2,5	65	128	138,7	71,7
5	60	124	124,0	77,5
8	50	135	112,5	73,6
Chuva 2				
0	60	30	30,0	11,9
2,5	75	29	36,3	8,2
5	60	26	26,0	9,2
8	50	23	19,2	7,0
0	95	102	161,5	77,8
2,5	60	85	85,0	30,4
5	60	89	89,0	46,5
8	50	86	71,7	33,8
0	40	122	81,3	67,8
2,5	35	125	72,9	45,5
5	40	143	95,3	69,3
8	40	133	88,7	67,2

As perdas de água por escoamento superficial foram maiores na intensidade de 80 mm h⁻¹ do que na de 120 mm h⁻¹, isso se deve ao maior teor de água presente no solo quando da aplicação da chuva de 80 mm h⁻¹ (Tabela 3), a umidade do solo na superfície, antes da chuva, exerce influência no total de água infiltrada e perdida no escoamento superficial (HORTON, 1940 e PHILIP, 1957).

Para a chuva 2 (tabela 2), o tempo de duração das aplicações foram inferiores aos da chuva 1, ou seja, mais rapidamente atingiu-se a taxa de escoamento constante, conseqüentemente a quantidade de precipitação aplicada foi menor. Isso pode ser atribuído a maior umidade inicial do solo no início da aplicação das chuvas (Tabela 3). Em solos com umidade inicial elevada a capacidade de infiltração básica e/ou taxa de escoamento constante é atingida com menos tempo de chuva, quando comparado a solos com baixa umidade inicial.

Na chuva 2, as perdas de água por escoamento superficial nas intensidades de chuva de 30 e 120 mm h⁻¹, foram maiores do que na chuva 1. No entanto, na intensidade de 80 mm h⁻¹ o comportamento foi o inverso. Isso é explicado pelo menor teor de água no início da aplicação da chuva 2, pois a mesma foi realizada 96 horas após a chuva 1, sendo uma exceção em relação as demais que foram realizadas 24 horas após término da chuva 1. Nesse intervalo maior de tempo drenagem e a evaporação promoveram o secamento da camada superficial do solo.

Nas intensidades de 30 mm h⁻¹ as perdas de água por escoamento superficial representaram 39,7, 22,6, 35,4 e 36,5%, respectivamente, para quantidade de chuva aplicada de 30,0, 36,3, 26,0 e 19,2 mm. Nas aplicações de 80 mm h⁻¹ os valores médios de escoamento superficial foram de 48,2, 35,8, 52,2 e 47,2 %, respectivamente, da quantidade de chuva de 161,5, 85,0, 89,0 e 71,7 mm. Para as chuvas simuladas de 120 mm h⁻¹ os valores de escoamento superficial foram de 83,4, 62,4, 72,7 e 75,8%, respectivamente, para a quantidade aplicada de 81,3, 72,9, 95,3 e 88,7 mm.

As maiores perdas de água por escoamento superficial foram observadas nas chuvas de intensidade mais elevadas (tabelas 2 e 4). REICHERT et al. (1992), utilizando sete diferentes solos também observaram um comportamento semelhante.

Em relação às declividades do terreno (tabela 2), os valores do escoamento aumentam em função do aumento da declividade. Para a chuva 1 esse comportamento é mais evidente pelo fato que as intensidades das precipitações simuladas foram semelhantes para as quatro declividades. Para a chuva 2 houve

uma maior desuniformidade da aplicação das simulações de mesma intensidade, dificultando essa visualização.

A partir do início o processo de escoamento superficial, a magnitude deste, depende além da diferença entre a intensidade de aplicação e a capacidade de infiltração, mas também da declividade da superfície do solo (CARLESSO; ZIMMERMANN, 2000).

4.3 Condições de umidade do solo

As chuvas simuladas de mesma intensidade foram aplicadas no mesmo dia nas quatro declividades. Observa-se um acréscimo no conteúdo inicial de água com o aumento da declividade do terreno. Nesses locais o solo apresentava drenagem impedida em profundidade, com um horizonte Bt (B textural) menos profundo. Nas declividades avaliadas a umidade volumétrica do solo para a saturação variou de 45 a 49%. Para a chuva 1 os teores de umidade mais elevados no início da aplicação da chuva foram de 26,08 e 27,47% para as declividades 5 e 8%, respectivamente, intensidade de 80 mm h^{-1} .

Para a chuva 2, intensidades de 30 mm h^{-1} e 120 mm h^{-1} os valores iniciais de umidade do solo foram mais elevados em comparação com a chuva 1, devido a presença de água da aplicação anterior. Valores de 31,90 e 30,26 %, foram observados na intensidade de 120 mm h^{-1} para as declividades de 5 e 8%, respectivamente.

Tabela 3 - Valores de intensidade da chuva e umidade do solo (antes da simulação e de saturação) nas diferentes declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.

Declividade (%)	Intensidade da precipitação (mm h ⁻¹)	Umidade de saturação (%)	Umidade inicial (%)
Chuva 1			
0	29	45	17,89
2,5	30	49	15,79
5	25	49	21,62
8	26	48	21,52
0	93	45	21,07
2,5	84	49	22,45
5	98	49	26,08
8	84	48	27,47
0	123	45	14,05
2,5	128	49	14,5
5	124	49	15,2
8	135	48	17,57
Chuva 2			
0	30	45	26,24
2,5	29	49	28,02
5	26	49	31,68
8	23	48	28,77
0	102	45	18,99
2,5	85	49	19,06
5	89	49	19,22
8	86	48	23,40
0	122	45	23,36
2,5	125	49	29,84
5	143	49	31,90
8	133	48	30,26

4.4 Resíduos vegetais na superfície do solo

Na tabela 4 são apresentadas as médias da taxa de escoamento superficial constante e do tempo de início do escoamento, analisadas para as coberturas do solo 0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia, para as diferentes declividade e

intensidades de chuvas simuladas. Como a intensidade da chuva aplicada não correspondeu à chuva programada, para as análises estatísticas ajustaram-se as variáveis em função dos valores programados.

Tabela 4 - Valores da taxa de escoamento constante e início do escoamento, para 0, 3 e 6 Mg ha⁻¹ em diferentes declividades do terreno para as intensidades de chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2010.

Declividade (%)	Precipitação (mm h ⁻¹)	Taxa de escoamento constante (mm h ⁻¹)	Início do escoamento (minutos)
Chuva 1			
0	30	--	--
0	80	63,50 ^{ns}	10,26 ^{ns}
0	120	55,11 ^{ns}	6,48 ^{**}
2,5	30	5,87 ^{**}	65,00 ^{**}
2,5	80	47,36 ^{ns}	3,41 ^{ns}
2,5	120	80,41 ^{ns}	3,88 ^{**}
5	30	5,87 ^{**}	65,00 ^{**}
5	80	60,83 ^{ns}	3,50 ^{**}
Declividade (%)	Precipitação (mm h ⁻¹)	Taxa de escoamento constante (mm h ⁻¹)	Início do escoamento (minutos)
5	120	90,32 ^{ns}	2,54 ^{**}
8	30	9,77 ^{**}	60,11 ^{ns}
8	80	70,03 ^{ns}	4,46 ^{**}
8	120	98,82 ^{ns}	2,67 ^{**}
Chuva 2			
0	30	16,80 ^{ns}	13,21 ^{ns}
0	80	54,40 ^{ns}	5,26 ^{ns}
0	120	113,94 ^{ns}	1,83 ^{**}
2,5	30	10,25 ^{ns}	24,06 ^{ns}
2,5	80	40,07 ^{**}	6,05 ^{**}
2,5	120	86,44 ^{ns}	3,37 ^{**}
5	30	15,55 ^{**}	16,13 ^{**}
5	80	53,46 ^{**}	6,31 ^{**}
5	120	97,00 ^{ns}	3,18 ^{**}
8	30	15,94 ^{ns}	15,06 ^{**}
8	80	47,54 ^{**}	5,06 ^{**}
8	120	102,00 ^{ns}	2,67 ^{**}

^{**}significativo (linhas) a 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

^{ns} não significativo (linhas) a 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

Para o tempo de início do escoamento os tratamentos apresentaram diferenças significativas basicamente em todas as declividades e intensidade de chuvas. Na chuva 1 (figuras 4, 7 e 10), observa-se que o tempo de início do escoamento é atrasado com o incremento do resíduo vegetal.

Para a chuva de 30 mm h^{-1} (Figura 4) aplicada em um solo com declividade de 5%, utilizando 2,5 e 5 Mg ha^{-1} de resíduo, ocorreu um retardamento nesse tempo de início do escoamento superficial em 31 e 35 minutos, respectivamente, em relação ao solo desnudo.

Com o aumento da intensidade da chuva esse tempo diminui, pois a capacidade de infiltração do solo é excedida em menor tempo. Para a chuva de 80 mm h^{-1} na declividade de 8% (figura 7), o tempo de início do escoamento foi atrasado em 3 e 4 minutos, para as quantidades de resíduo de 2,5 e 5 Mg ha^{-1} , respectivamente. Na chuva de 120 mm h^{-1} declividade 2,5% (figura 10), os maiores atrasos foram de 2 e 6 minutos, com a utilização de 2,5 e 5 Mg ha^{-1} de resíduo, respectivamente.

Na chuva 2 (figuras 13,16 e 19), da mesma maneira que na chuva 1 os resíduos vegetais na superfície do solo promoveram um atraso no tempo de início do escoamento. Para a chuva de 30 mm h^{-1} na declividade de 5%. (figura 13), o atraso foi de 7 e 17 minutos, nos tratamentos com 2,5 e 5 Mg ha^{-1} de resíduo, respectivamente. Para as chuvas de 80 e 120 mm h^{-1} , o atraso foi de 3 minutos.

Esses resultados concordam com os observados por Bertol et al. (2006) que avaliando o preparo reduzido, preparo convencional e solo sem cultivo verificou que, o tempo de início do escoamento foi menor no preparo convencional e maior no preparo reduzido.

Para as chuvas 1 e 2, o tempo de início do escoamento superficial diminuiu com o aumento na intensidade da precipitação (Tabela 4). Segundo Alves; Cabeda (1999) isso ocorre porque sob chuva de maior energia cinética as alterações da superfície do solo ocorrem mais rapidamente, formando selo e diminuindo o tempo de início de escoamento superficial. Quando maior for a intensidade e a duração da chuva maior será a energia cinética da mesma.

O volume e a velocidade do escoamento superficial estão diretamente relacionados com a declividade do terreno (Bertoni e Lombardi Neto, 1993). O fator declividade é considerado um dos mais importantes, pois influi diretamente na

velocidade de escoamento superficial. Assim, em declividades maiores menor será o tempo de permanência da água sob a superfície do solo para que ocorra o processo de infiltração.

A afirmação que o tempo de início do escoamento para uma mesma intensidade de precipitação é reduzido com o incremento da declividade foi confirmada para a chuva 1. Para a chuva de 120 mm h^{-1} observou-se uma redução no tempo de início do escoamento para a declividade zero de 45, 61 e 59%, respectivamente, em relação as declividades de 2,5, 5 e 8%. Para a chuva 2 esse comportamento foi menos evidente, ratificando assim, a importância de fatores como a condição de umidade do solo anterior a chuva, a intensidade da chuva e a quantidade de cobertura da superfície do solo, sobre este parâmetro.

A presença ou a manutenção de restos culturais sobre a superfície do solo é um fator importante para amenizar o impacto direto das gotas de chuva, diminuindo o selamento superficial, aumentando a lâmina de água infiltrada, contribuindo para a redução das perdas de água no solo.

A taxa de escoamento constante foi maior com o incremento da declividade e da intensidade da chuva, independente da quantidade de resíduos vegetais na superfície do solo. Diferenças entre os tratamentos ($P < 0,05$) para a chuva 1, foram observadas nas chuvas de 30 mm h^{-1} , declividades 2,5, 5 e 8% e na chuva 2, para a chuva de intensidade de 80 mm h^{-1} .

A taxa de escoamento constante apresentou um comportamento inverso ao tempo de início do escoamento quando a capacidade de infiltração de água do solo é excedida, inicia o escoamento superficial e a magnitude do escoamento superficial depende da intensidade da chuva. Resultados semelhantes foram observados por Spohr (1997), trabalhando com diferentes solos e níveis de cobertura.

4.6 Taxa de escoamento superficial e escoamento superficial acumulado.

Os valores do tempo de início do escoamento superficial, da taxa de escoamento superficial em um determinado tempo (minutos), bem como a taxa de escoamento constante foram utilizados para estimar o expoente “b” do modelo modificado de Smith (ALVES; CABEDA, 1999).

Observaram-se variações nos valores do expoente “b”, para as declividades, níveis de cobertura do solo e intensidades de chuvas. Os fatores relacionados ao tempo de início do escoamento superficial (solo, cobertura vegetal, relevo, etc.) e a chuva (duração e intensidade) influenciam o expoente “b” o qual é ajustado a partir destes fatores.

Para a chuva 1, o menor e o maior valor do expoente “b” foi para o solo desnudo de 0,2 e 5,5, respectivamente, para as chuvas de 120 mm h^{-1} e 30 mm h^{-1} (ambas na declividade de 5%). Esses resultados concordam com os obtidos por Alves; Cabeda (1999), que observaram um aumento do expoente “b” com a redução da intensidade da chuva simulada.

Para a chuva 2, a amplitude dos valores do expoente “b” foi menor. Além disso, verificaram-se valores mais baixos do expoente “b”. Intensidade de chuva mais elevadas e maiores teores de umidade inicial tendem a ocasionar baixos valores do expoente “b”. Isso ocorre porque, mais rapidamente a taxa de escoamento constante é atingida, devido ao maior umedecimento do solo. Resultados similares foram relatados por Spohr (2007). Esse mesmo autor afirma que, as implicações de um baixo valor de “b” é uma curvatura de escoamento instantâneo mais suave e o valor constante de escoamento é atingindo após mais tempo de duração da chuva, quando comparado a um elevado valor de “b”.

Os valores da taxa de escoamento superficial observada a campo (chuva 1) e ajustada pelo modelo de Smith, para um período de 120 minutos e, suas respectivas relação (1:1) entre os valores observado e estimados são apresentados nas figuras de 4 a 12.

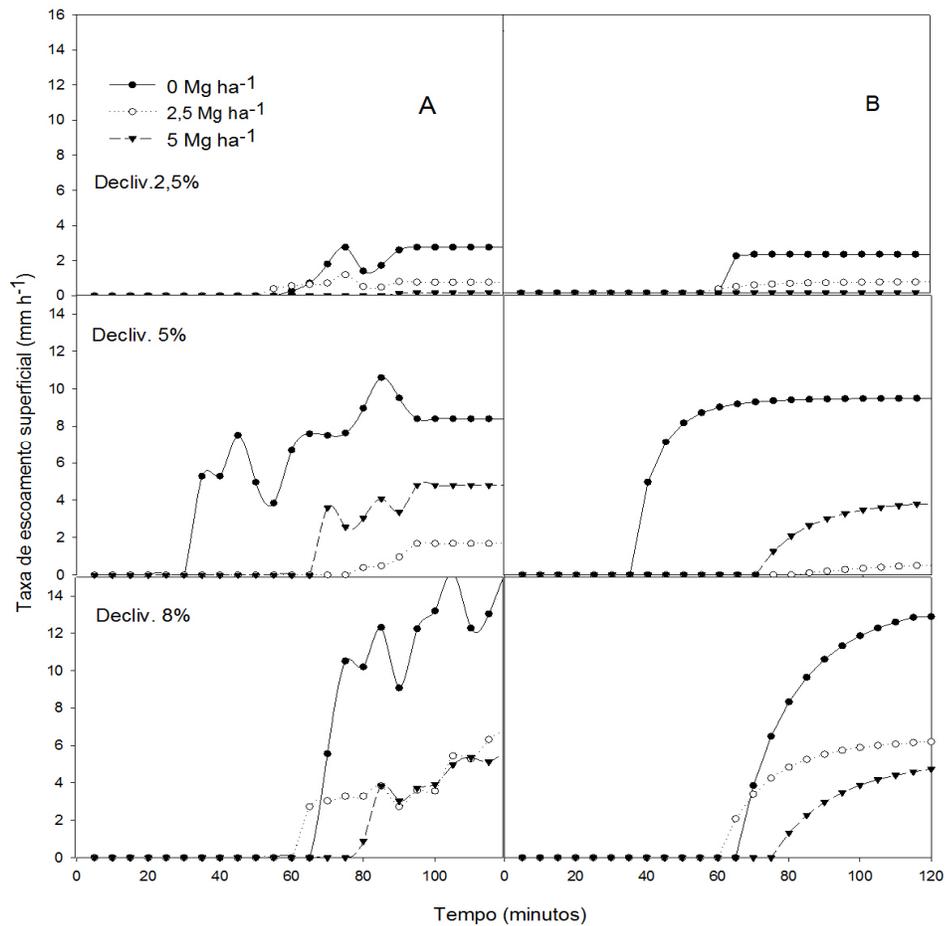


Figura 4 - Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para a chuva de 30 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.

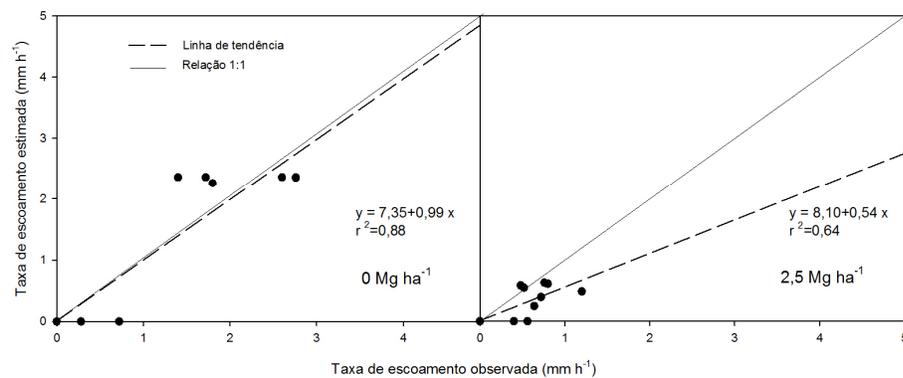


Figura 5 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo na declividade de 2,5% e intensidade de chuva de 30 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.

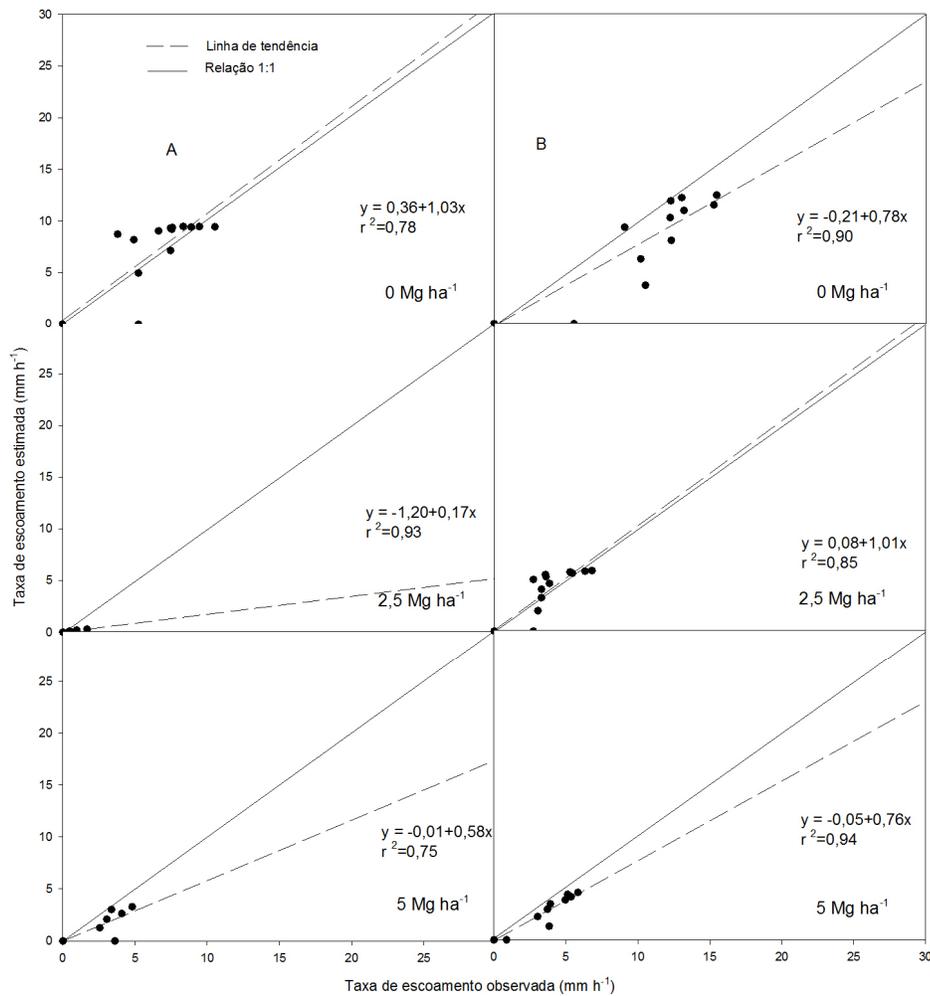


Figura 6 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e intensidade de chuva de 30 mm h⁻¹ (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.

Nas chuvas de 30 mm h⁻¹ (figura 4) os valores ajustados pelo modelo de Smith, tenderam a uma subestimativa da taxa de escoamento superficial (figuras 5 e 6). Com a utilização de 5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia, o modelo subestimou a taxa de escoamento superficial constante em 7 e 16% para as declividades de 5 e 8%, respectivamente (figura 6).

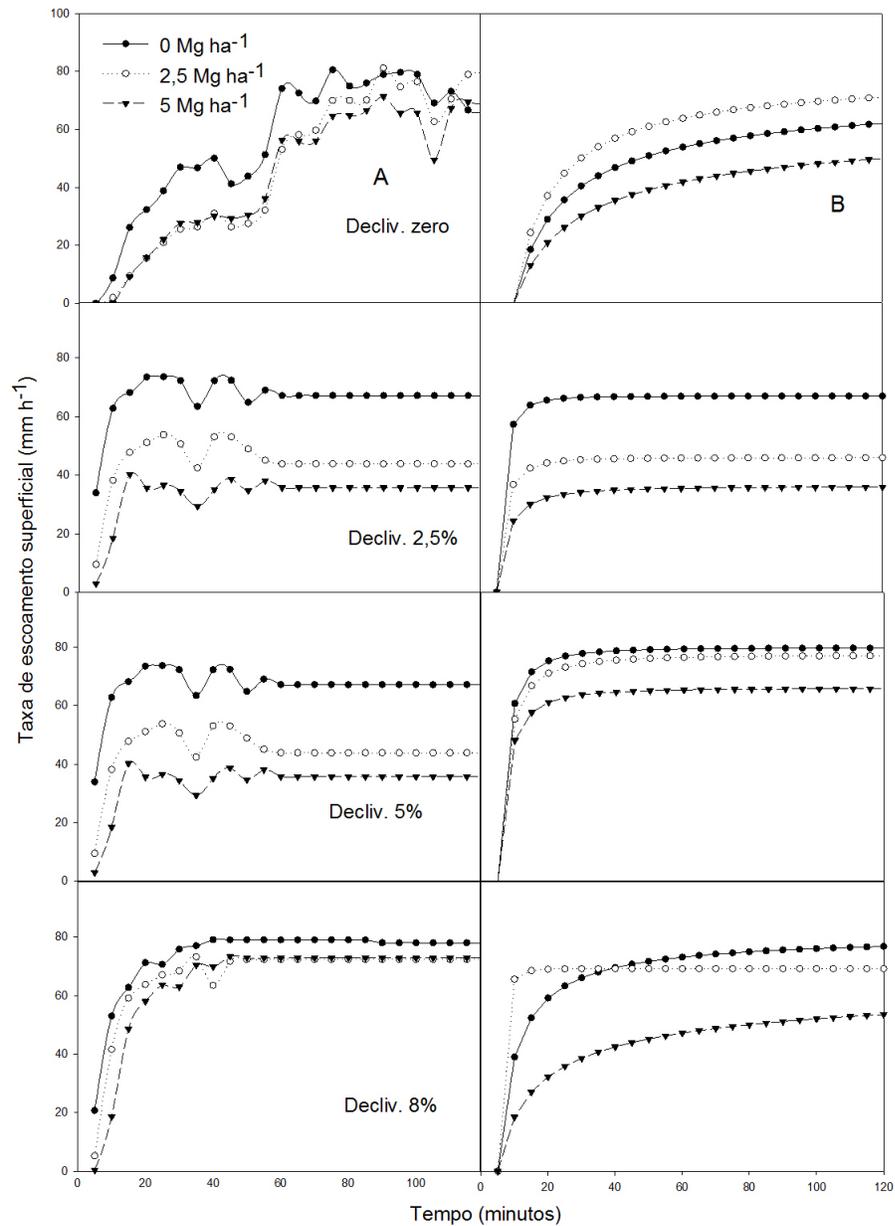


Figura 7 - Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e estimada pelo modelo de Smith (B), para a chuva de 80 mm h⁻¹ em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.

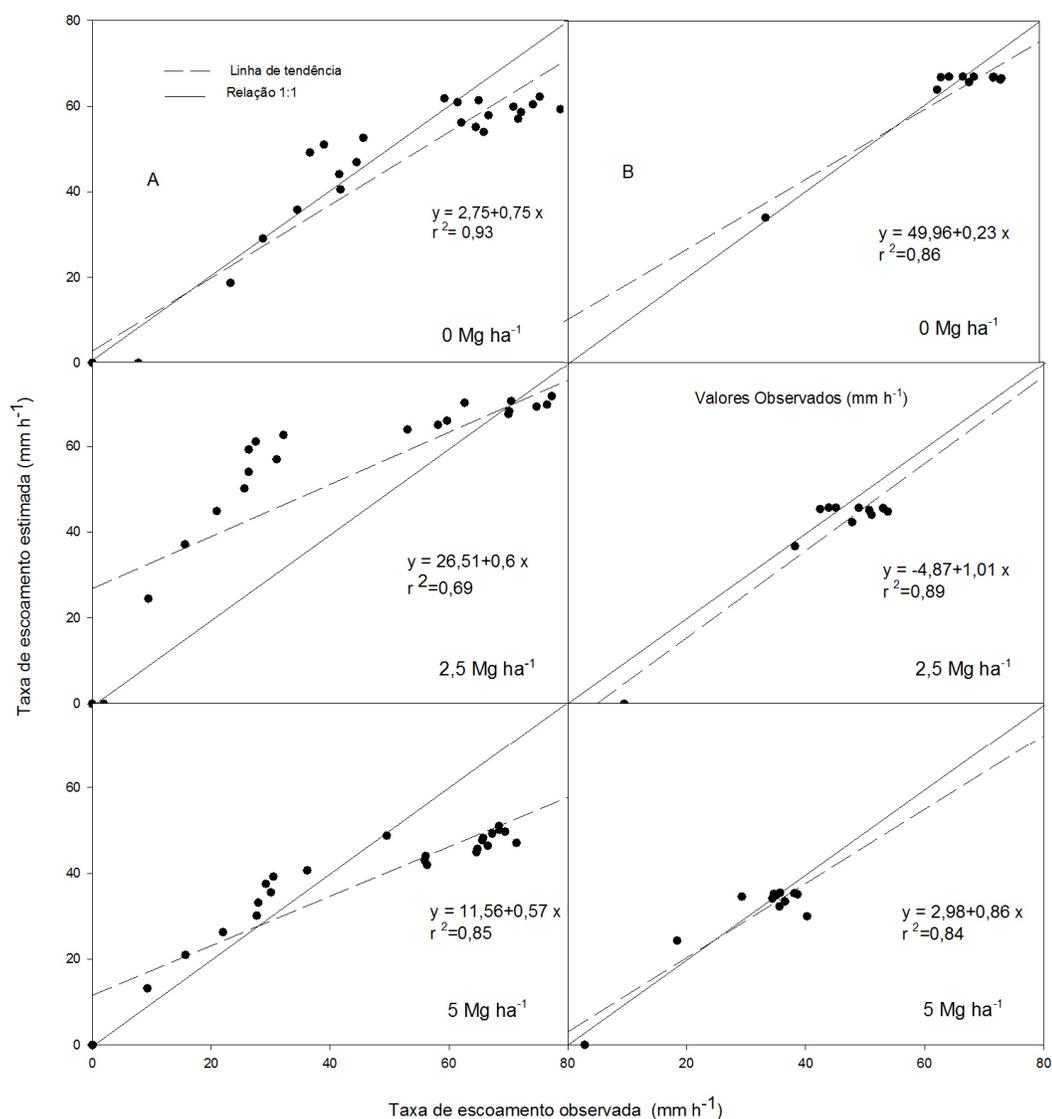


Figura 8 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith para uma chuva de 80 mm h⁻¹, para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.

Nas chuvas de 80 mm h⁻¹ (figura 7), para as declividades 2,5 e 8% as diferenças entre a taxa de escoamento superficial observada e ajustada foram mínimas. Nas demais declividades o modelo de Smith tendeu a subestimativa desses valores figuras 8 e 9.

Para a declividade zero (figura 8) os valores da taxa de escoamento superficial constante ajustado por Smith foram 18, 11 e 28 % menores do que os observados para os tratamentos com 0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo na superfície do solo, respectivamente.

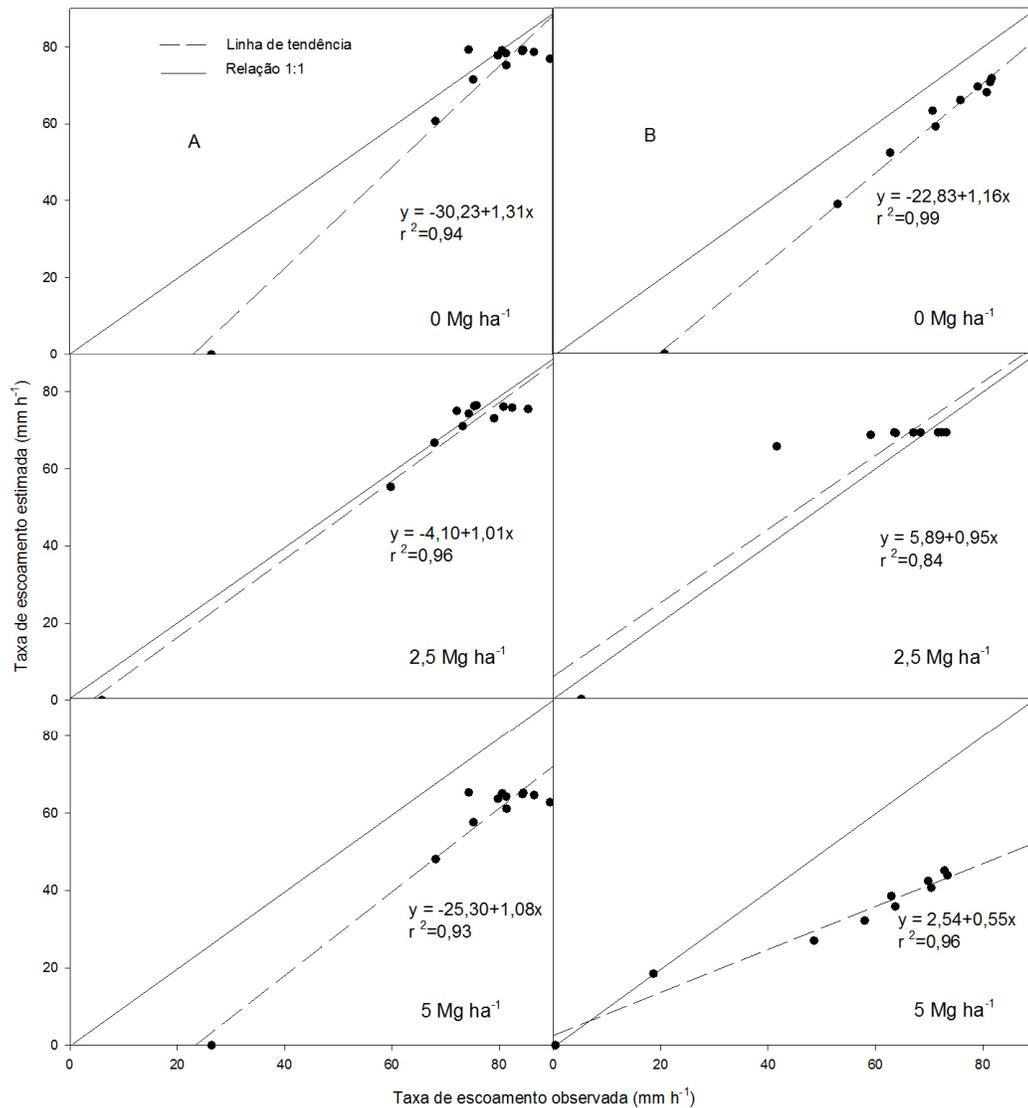


Figura 9 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 80 mm h⁻¹ em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.

Para a declividade de 5% (figura 9) a taxa de escoamento superficial constante foi subestimada em 5 e 26%, para os tratamentos 0 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo na superfície do solo, respectivamente.

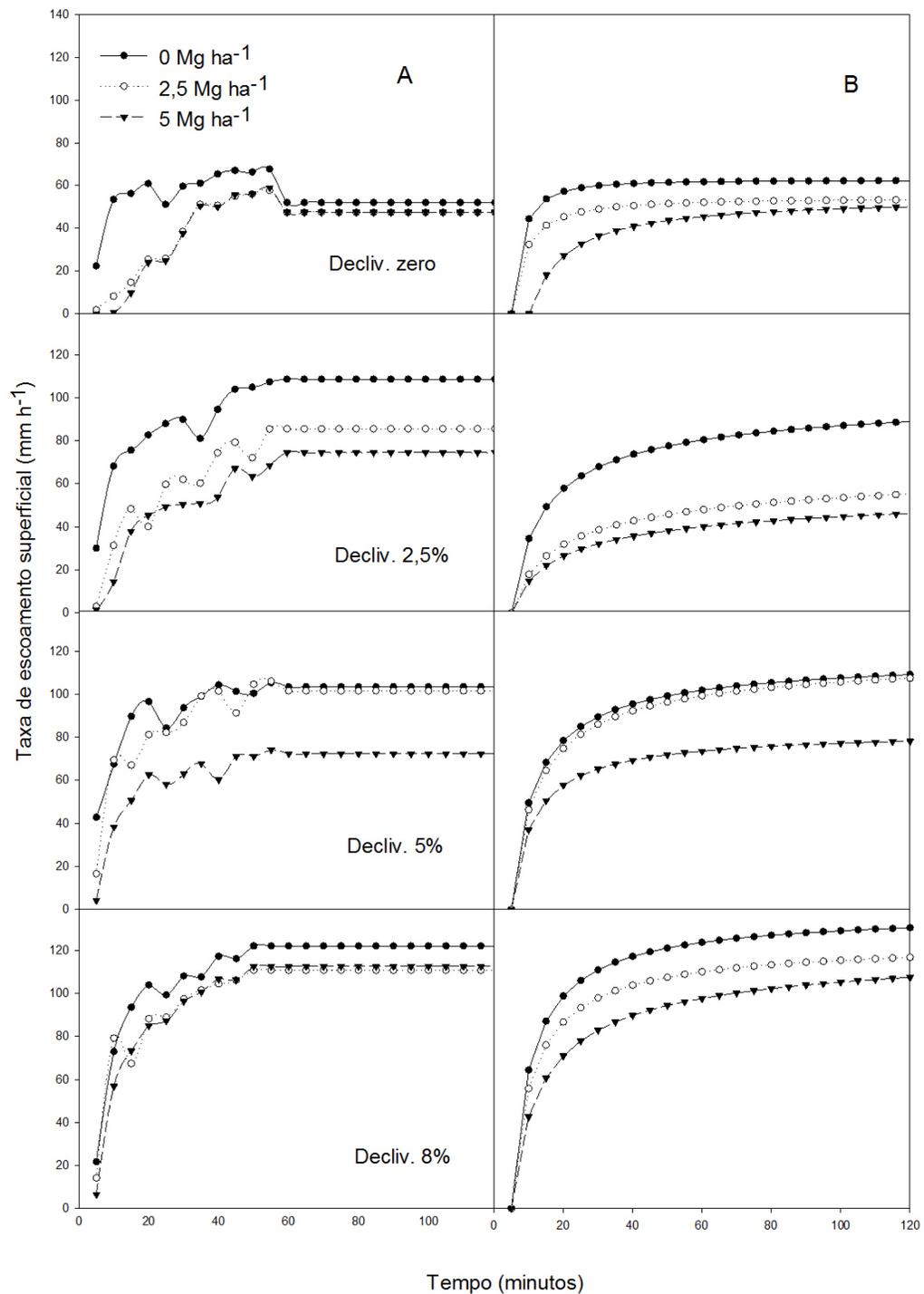


Figura 10 - Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para uma chuva de 120 mm h⁻¹. Santa Maria, RS, 2010.

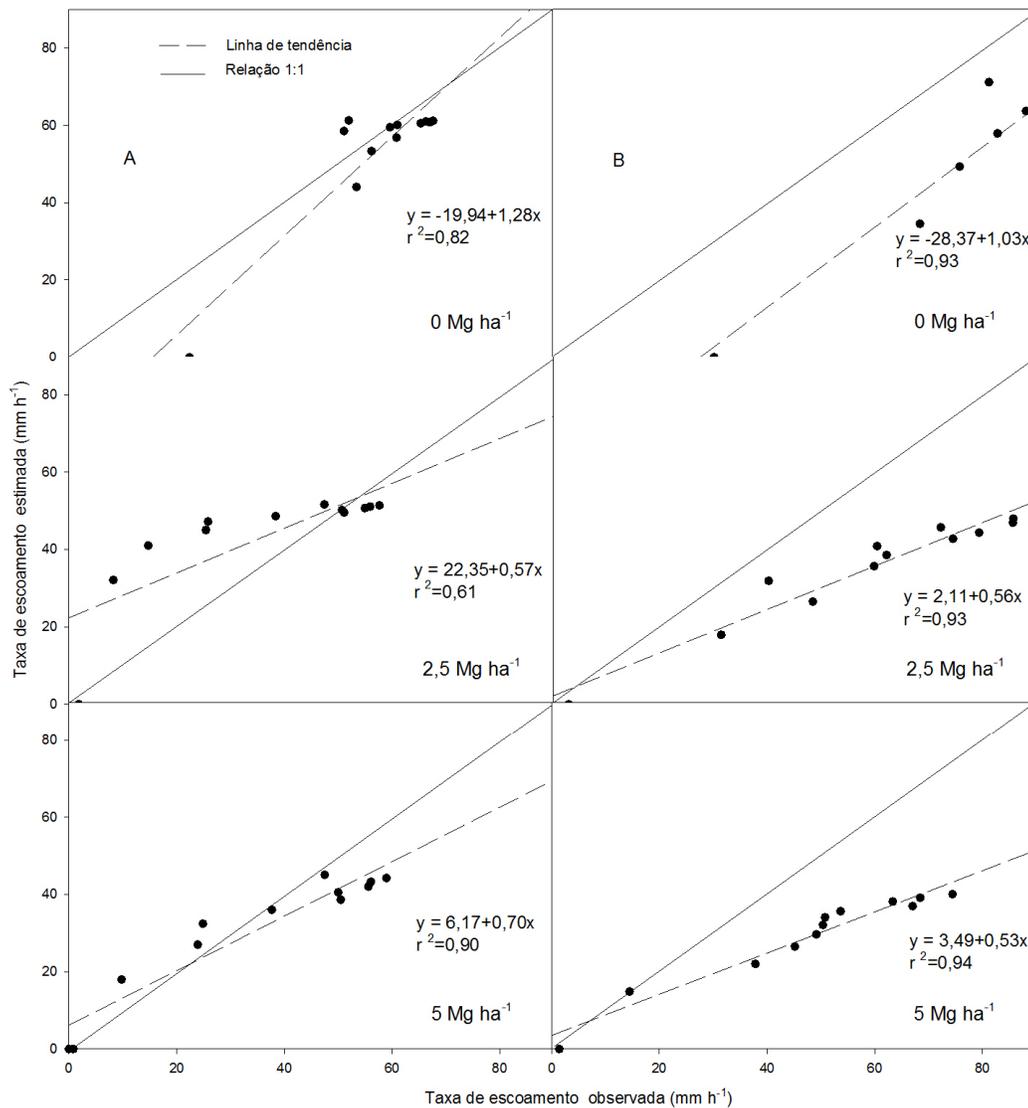


Figura 11 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 120 mm h⁻¹ em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.

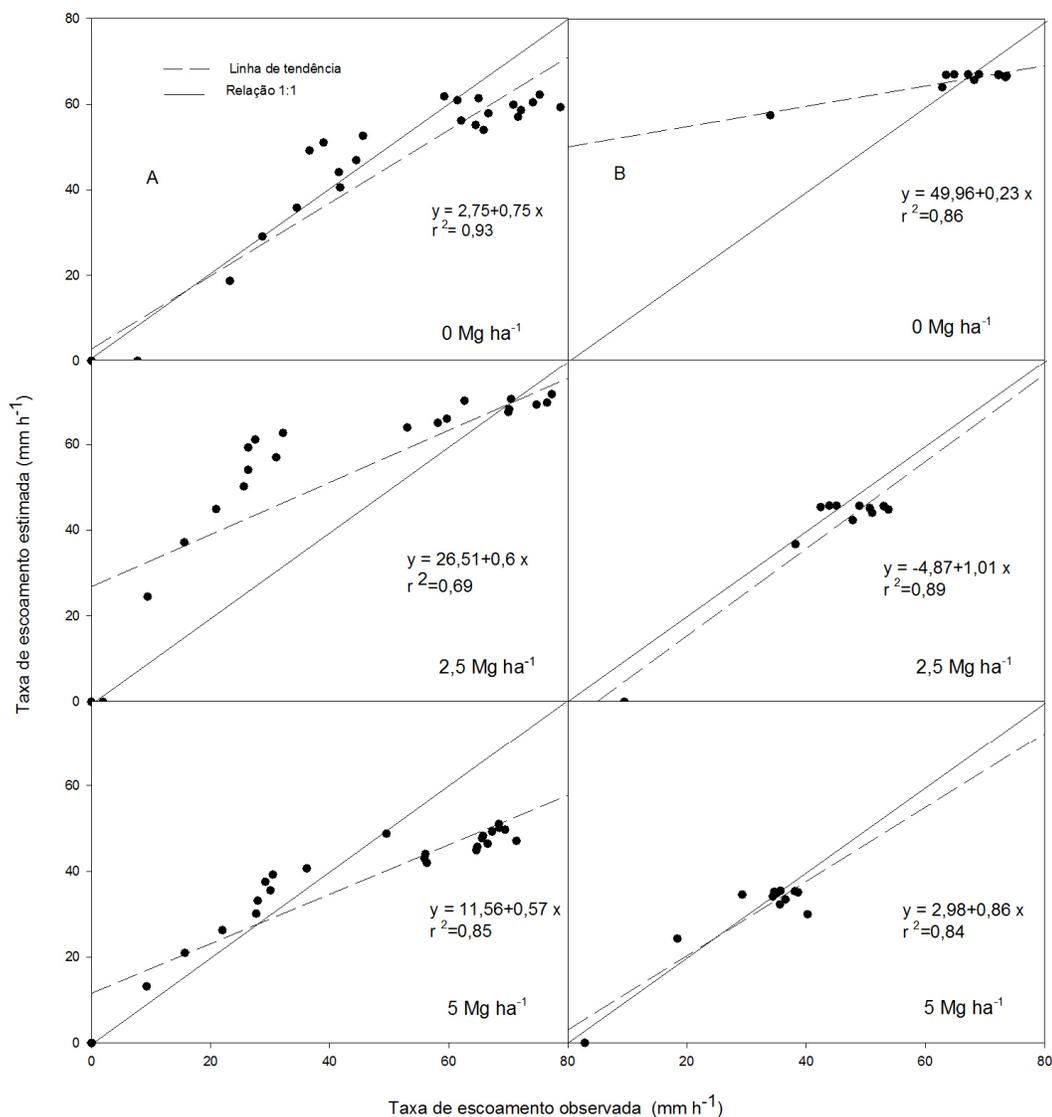


Figura 12 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 120 mm h⁻¹ em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.

Na chuva de 120 mm h⁻¹ (figura 10), com a utilização de 5 Mg ha⁻¹ de resíduo o modelo de Smith subestimou a taxa de escoamento superficial constante em todas as declividades e níveis de cobertura da superfície do solo (figuras 11 e 12). O modelo subestimou em 9, 33, 7 e 15% para as declividades 0, 2,5, 5 e 5%, respectivamente.

Observa-se nas figuras 4, 7 e 10, redução na taxa de escoamento superficial constante com a adição do resíduo vegetal de aveia na superfície do solo, para as diferentes intensidades de chuva.

Para a chuva de 30 mm h^{-1} declividade de 8% (figura 4, tabela 4) o incremento do resíduo vegetal causou uma redução de 54 e 60% para os tratamentos de 2,5 e 5 Mg ha^{-1} , respectivamente, em relação ao solo desnudo na taxa de escoamento superficial.

Nas chuvas de 80 mm h^{-1} (Figura 7) e 120 mm h^{-1} (Figura 10) na declividade de 8% as reduções na taxa de escoamento superficial constante foram maiores com a adição de 2,5 Mg ha^{-1} do que com a utilização de 5 Mg ha^{-1} . As reduções observadas foram de 14 e 10% nas intensidades 80 e 120 mm h^{-1} , respectivamente.

Avaliando quatro quantidades de massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo Silveira; Salvador (2000) observaram que, de 0 para 3 Mg h^{-1} de massa seca a redução nas perdas de água por escoamento superficial foi de aproximadamente 70%. A partir dos 3 Mg h^{-1} de resíduo vegetal na superfície do solo, os efeitos da massa seca na redução das perdas de água foram mínimas.

Nas figuras 13 a 21 são apresentados os valores da taxa de escoamento superficial observada a campo (chuva 2) e ajustada pelo modelo de Smith, para um período de 120 minutos e, suas respectivas relação (1:1) entre os valores observados e estimados pelo modelo de Smith.

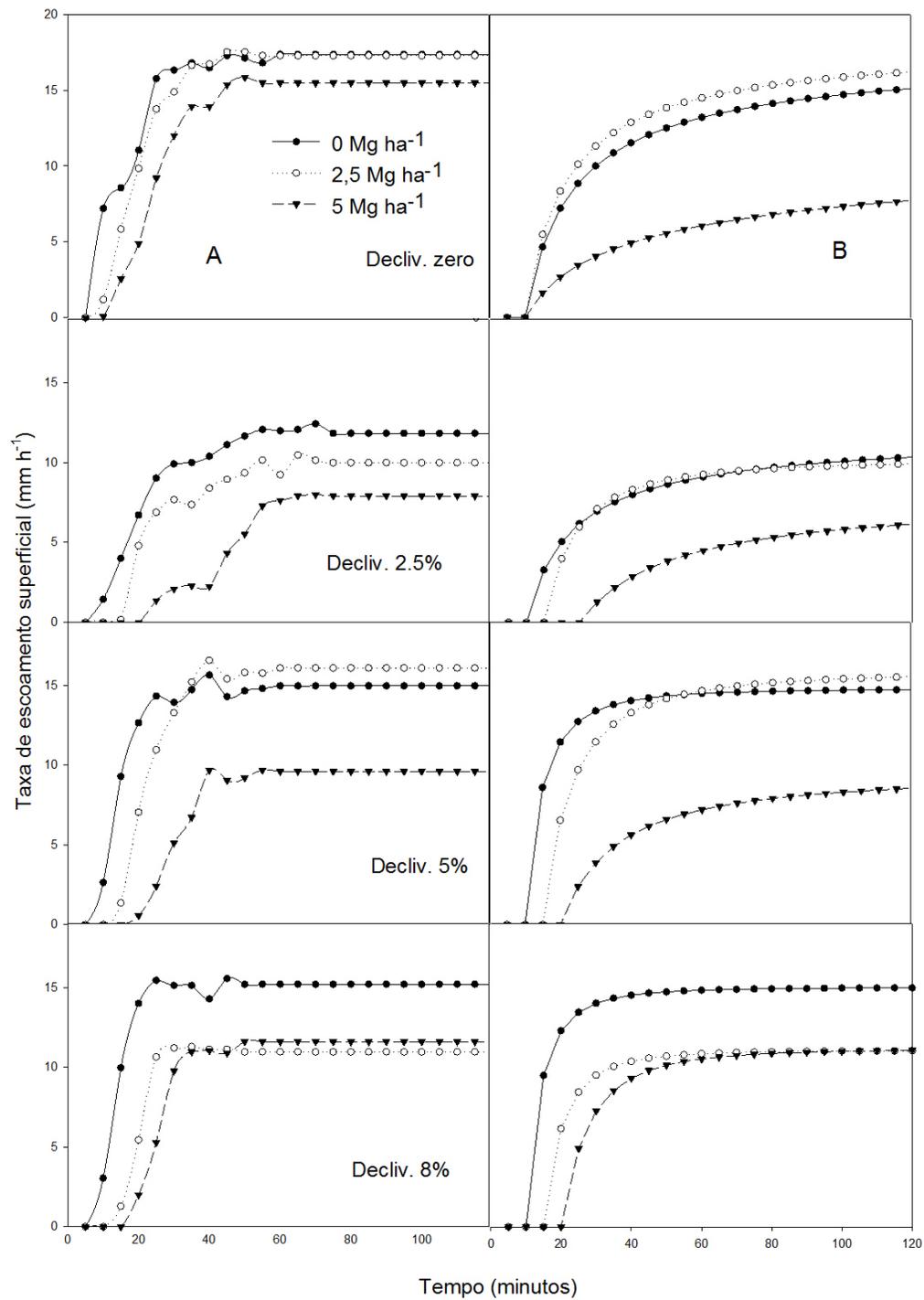


Figura 13 - Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para uma chuva de 30 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.

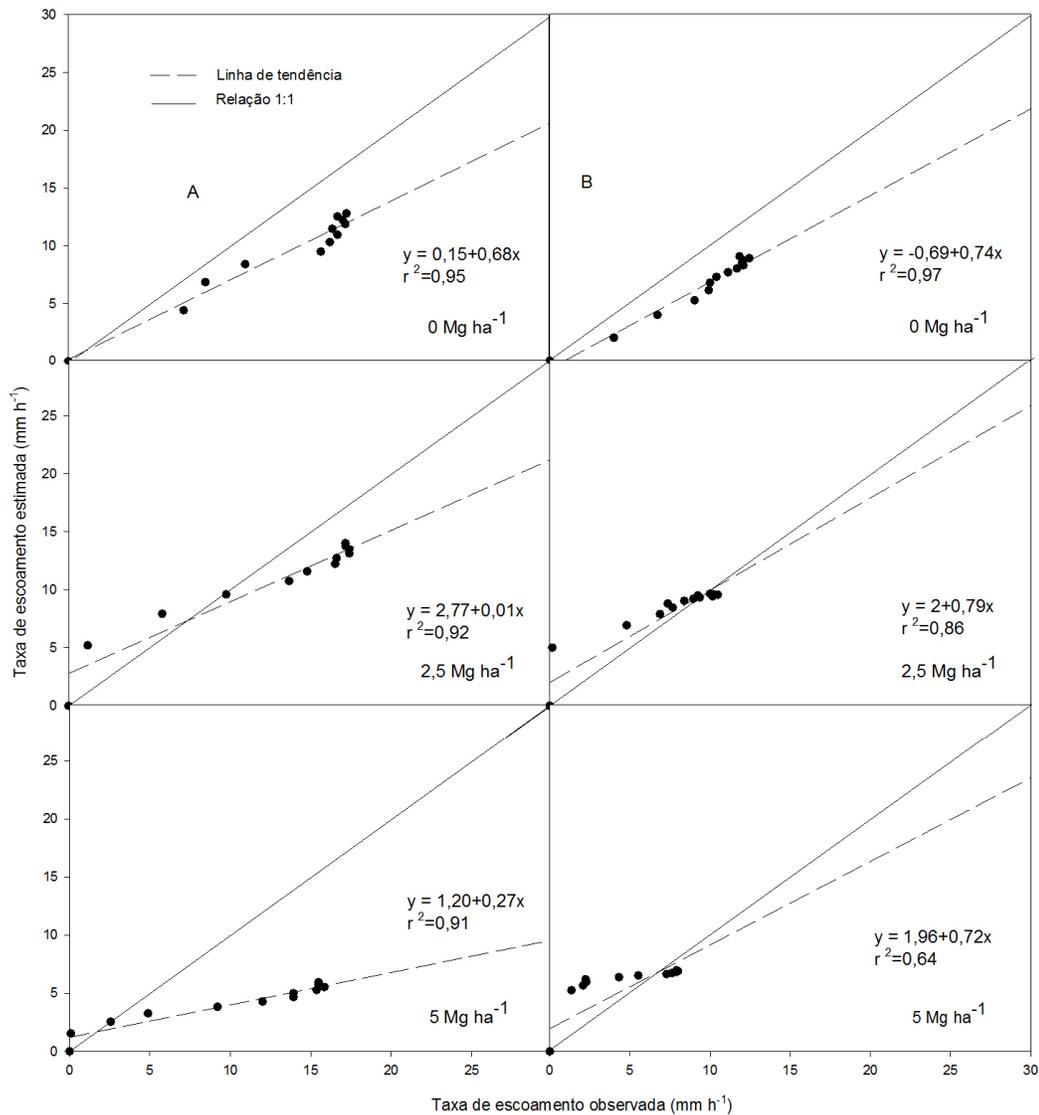


Figura 14 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 30 mm h⁻¹ em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.

Na chuva de 30 mm h⁻¹ (figura 13) para a declividade zero (figura 14) o modelo de Smith subestimou a taxa de escoamento superficial constante em todos os tratamentos, em média de 3, 2 e 8%, para tratamentos com 0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia, respectivamente.

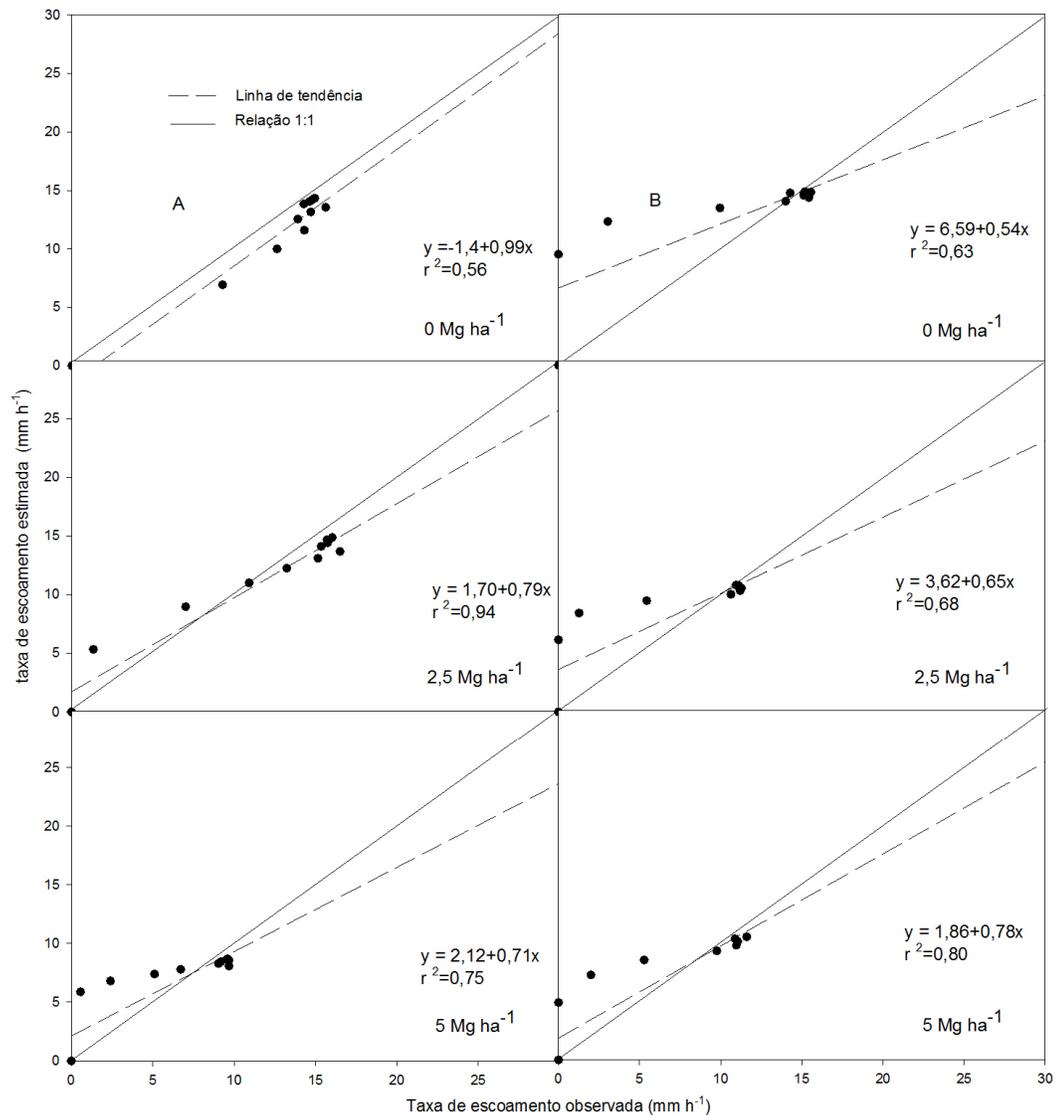


Figura 15 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 30 mm h⁻¹ em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.

Para as declividades 2,5, 5 e 8% a taxa de escoamento superficial medida a campo e a ajustada pelo modelo de Smith foram semelhantes (figuras 14 e 15). As diferenças na taxa de escoamento superficial constante ficaram de aproximadamente 2% (figura 13).

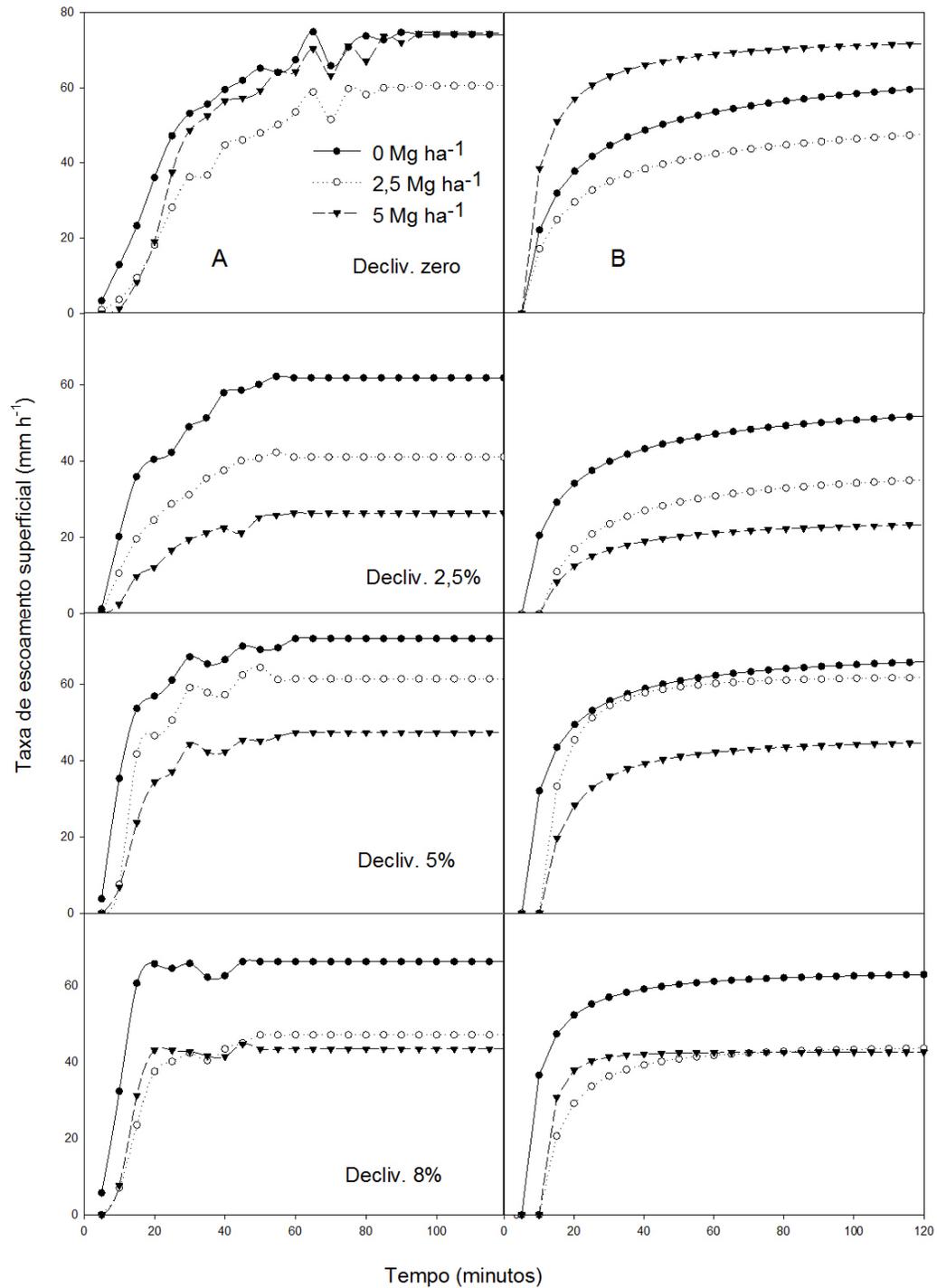


Figura 16 - Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para uma chuva de 80 mm h⁻¹. Santa Maria, RS, 2010.

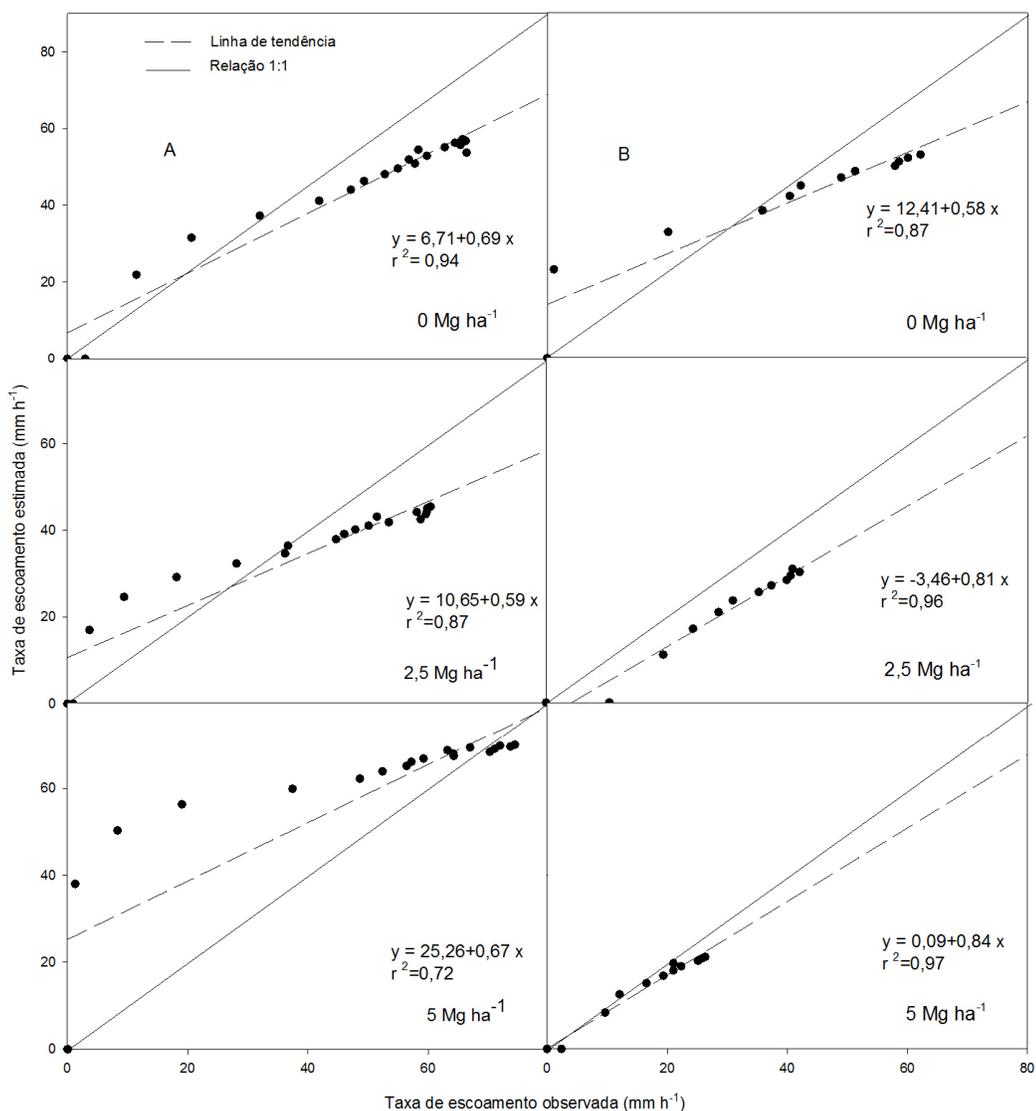


Figura 17 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 80 mm h⁻¹ em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.

Na chuva de 80 mm h⁻¹ (Figura 8) para as declividades 0 e 2,5% (figura 17) as diferenças entre as taxa de escoamento superficial observada e ajustada foram maiores para os tratamentos com 0 e 2,5 Mg ha⁻¹ de resíduo vegetal de aveia na superfície do solo.

Para declividade zero o modelo subestimou a taxa de escoamento superficial constante em 20, 22 e 4% para os tratamentos com 0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia, respectivamente.

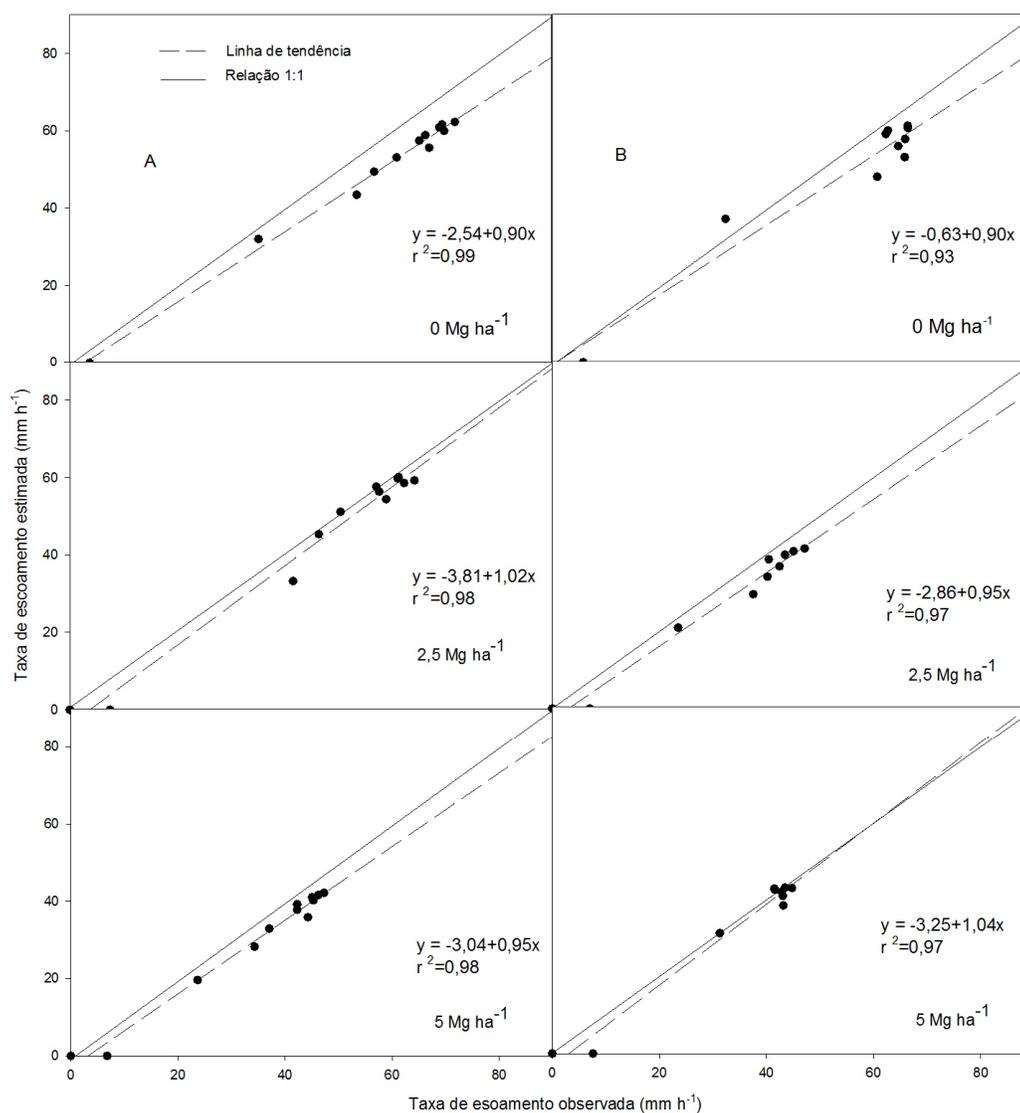


Figura 18 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 80 mm h⁻¹ em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.

Para a declividade de 2,5% os valores da taxa de escoamento superficial constante foram subestimados em 16, 15 e 9%, respectivamente, para os tratamentos com 0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia, respectivamente.

Na declividade de 5% no solo sem cobertura o modelo subestimou a taxa de escoamento superficial constante em 6,4% e, na declividade de 8% as diferenças entre valores obtidos e ajustados na taxa de escoamento superficial constante foram menores que 1%.

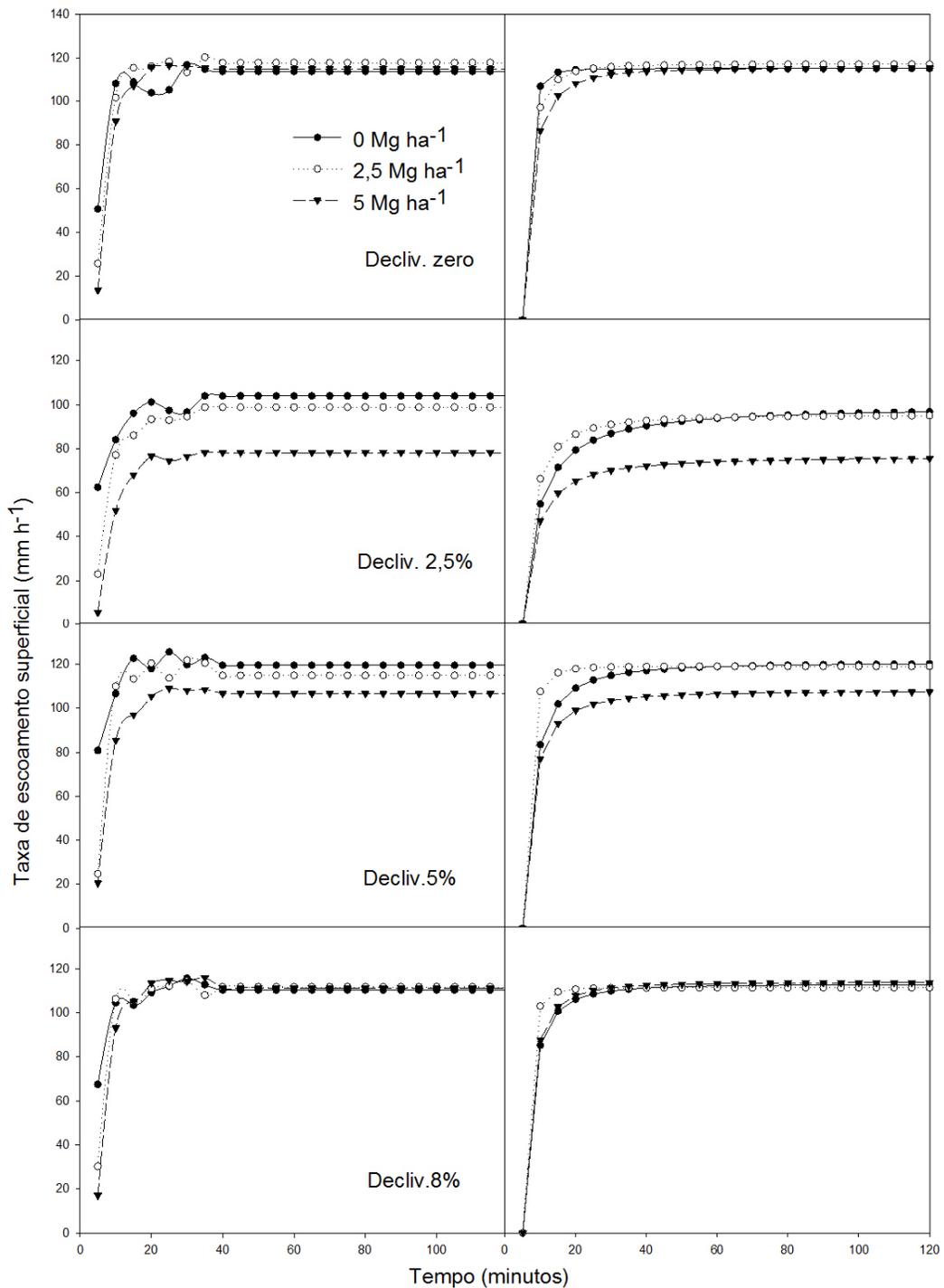


Figura 19 - Taxa de escoamento superficial observada a campo (A) e, estimada pelo modelo de Smith (B), em função dos diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e declividades do terreno, para uma chuva de 120 mm h⁻¹. Santa Maria, RS, 2010.

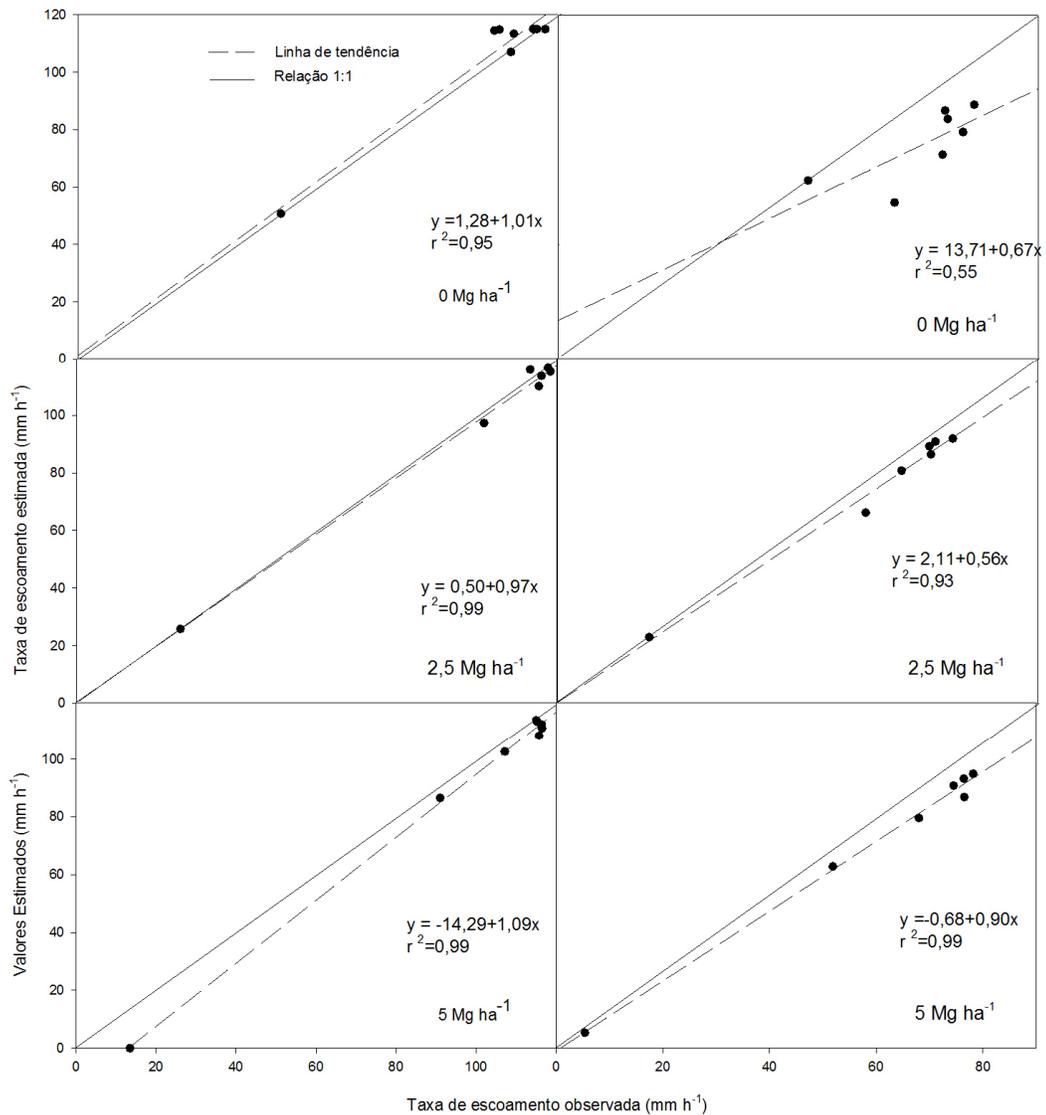


Figura 20 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 120 mm h⁻¹ em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.

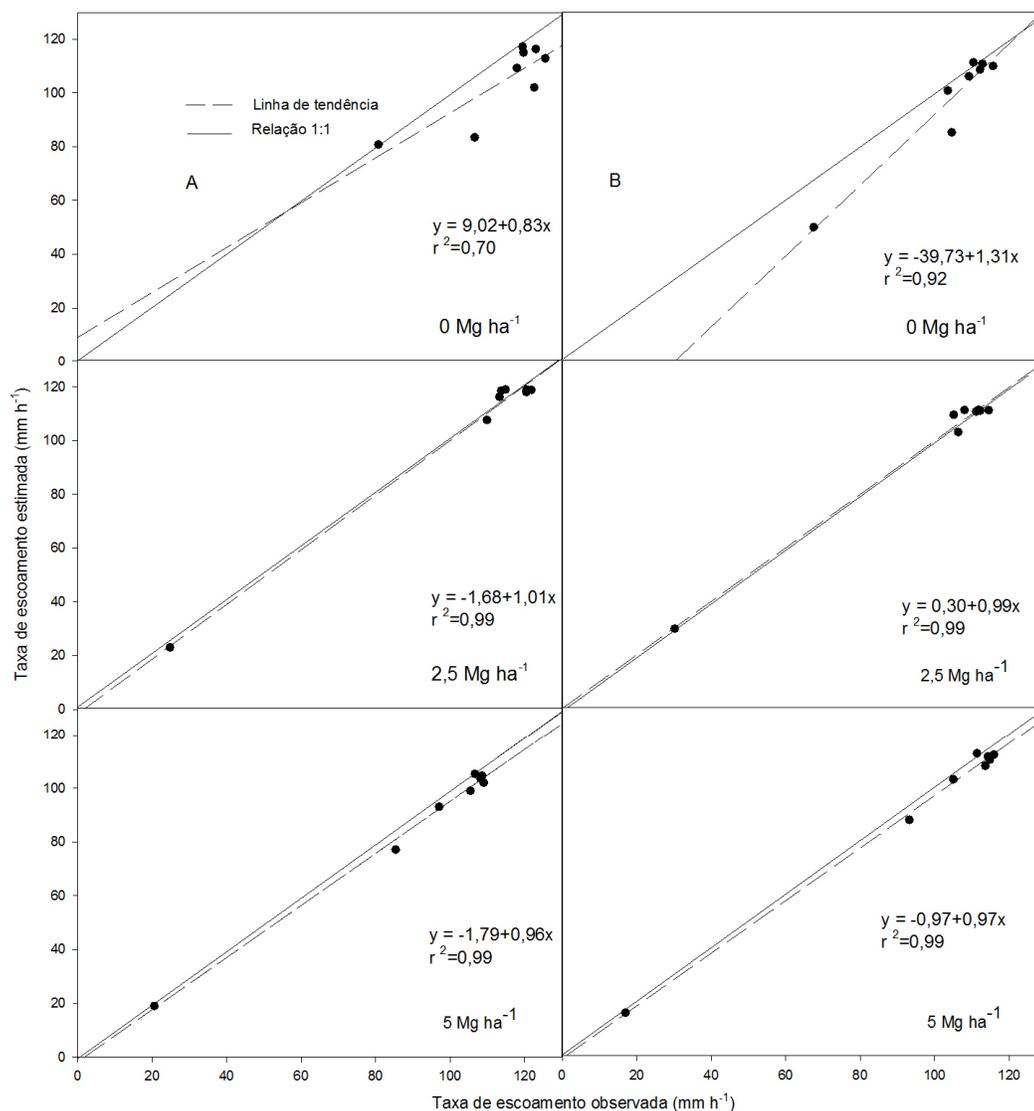


Figura 21 - Relação entre a taxa de escoamento superficial observada e a estimada pelo modelo de Smith, para uma intensidade de chuva de 120 mm h⁻¹ em função os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo (A) declividade de 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.

Na chuva de 120 mm h⁻¹ (Figura 19) para declividade de 2,5% (figura 20), o modelo subestimou a taxa de escoamento superficial constante em 3 e 1%, para solo com 0 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo na superfície do solo, respectivamente. Nas demais declividades os valores foram praticamente idênticos (figuras 20 e 21).

Os modelo de Smith tendeu a subestimar a taxa de escoamento superficial ao longo do tempo (chuvas 1 e 2), independente da intensidade da chuva aplicada e das condições do terreno (declividades, níveis de cobertura da superfície do solo, umidade inicial do solo).

Na chuva 2 (figuras 13, 16 e 19) da mesma maneira que na chuva 1 observa-se que a presença do resíduo de aveia na superfície do solo reduz a taxa de escoamento superficial constante. As reduções mais acentuadas na taxa de escoamento superficial constante, com a adição de resíduos vegetais de aveia, foram observadas nas declividades de 5, 2,5 e 2,5% para as chuvas de 30, 80 e 120 mm h⁻¹, respectivamente.

Para a chuva de 30 mm h⁻¹ essas reduções foram de 28 e 41% para 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo na superfície do solo, respectivamente. Para intensidade de 80 mm h⁻¹ a presença de 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo reduziu a taxa de escoamento superficial constante em 33 e 48%, respectivamente. Para a chuva de 120 mm h⁻¹ a presença de 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo diminuiu em 4 e 23%, respectivamente, a taxa de escoamento superficial constante.

Promovendo simulações de chuvas em solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa Silva; Kato (1998) observaram que, no solo desnudo, a taxa de infiltração foi praticamente estável, variando de 51,6 a 78 mm h⁻¹, proporcionando um valor médio de 61,3 mm h⁻¹. Na presença de cobertura morta os valores da taxa de infiltração variaram de 56 a 96 mm h⁻¹, com valor médio de 76,3 mm h⁻¹. Evidenciando dessa maneira a importante função desempenhada pela cobertura vegetal no favorecimento à elevação da taxa de infiltração de água no solo.

Nas figuras 22 a 27 são apresentados os valores de escoamento superficial acumulado (Chuvas 1 e 2) para a chuva de 120 mm h⁻¹ observado a campo e ajustado pelo modelo de Smith e, a relação (1:1) entre os valores observados e os estimados pelo modelo de Smith.

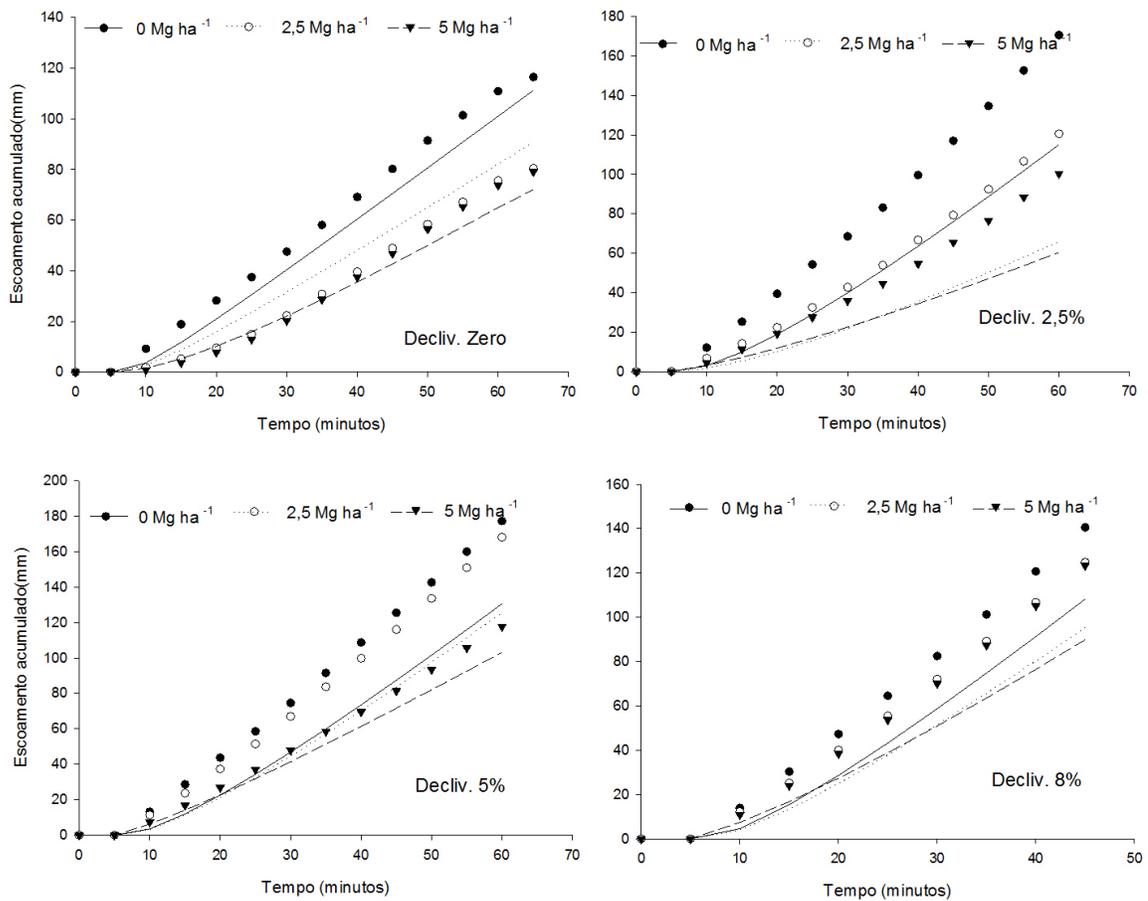


Figura 22 - Escoamento superficial acumulado, (símbolos) valores obtidos a campo, (linhas) valores ajustados pelo modelo de Smith para uma chuva de 120 mm h⁻¹(Chuva 1), em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.

Na chuva 1 (figura 22) na declividade zero com a utilização de 2,5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia na superfície do solo, o modelo Smith superestimou escoamento superficial acumulado em 9,5%. Porém, nas demais declividades e níveis de cobertura da superfície do solo o modelo Smith subestimou os valores do escoamento superficial acumulado.

Na declividade de 8% (figura 24) o modelo subestimou em 23, 24 e 17%, para os tratamentos de 0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia, respectivamente.

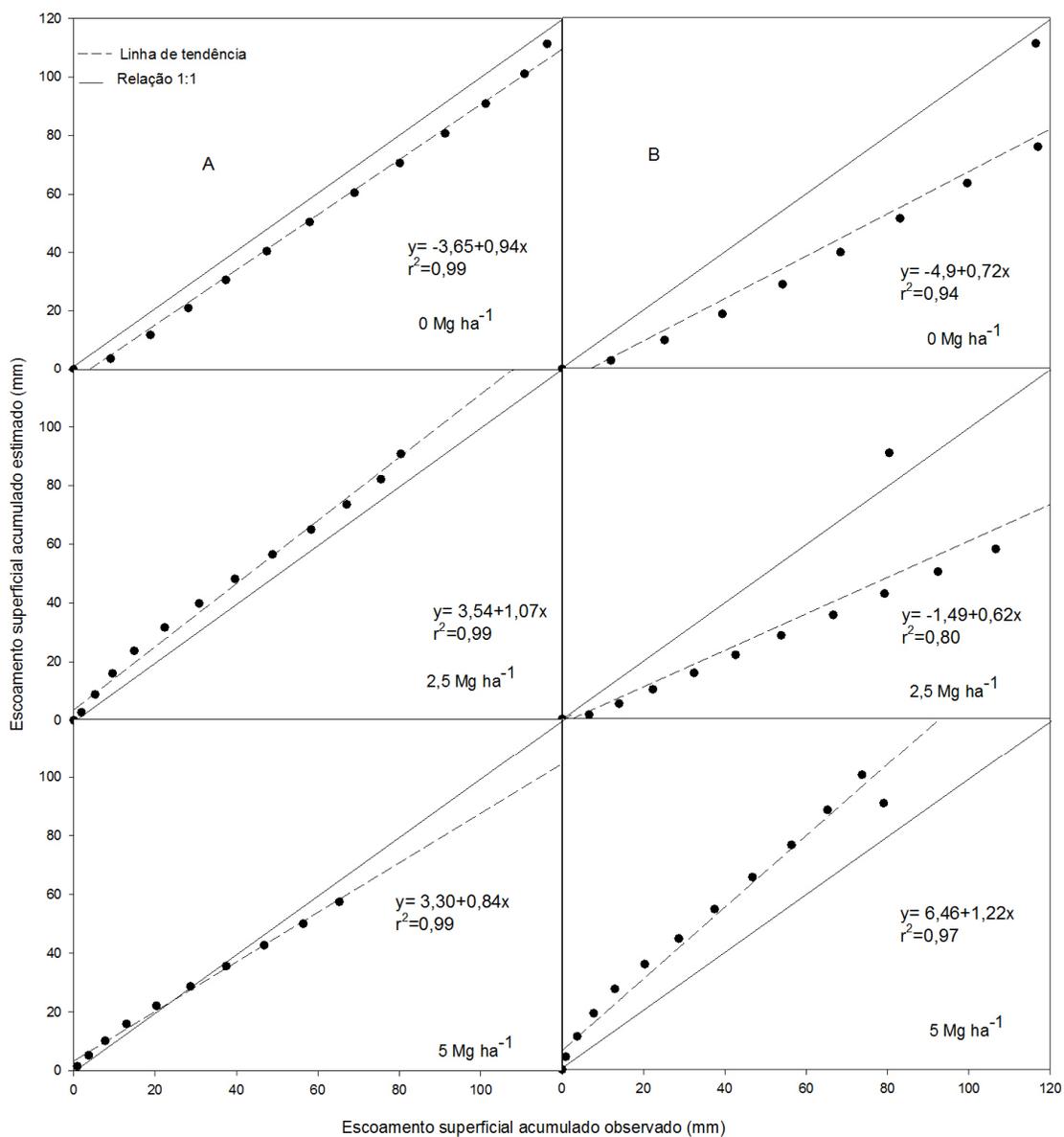


Figura 23 - Relação entre o escoamento superficial acumulado observado e o estimado pelo modelo de Smith (Chuva 1), para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo, sob uma intensidade de chuva de 120 mm h⁻¹ (A) declividade 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.

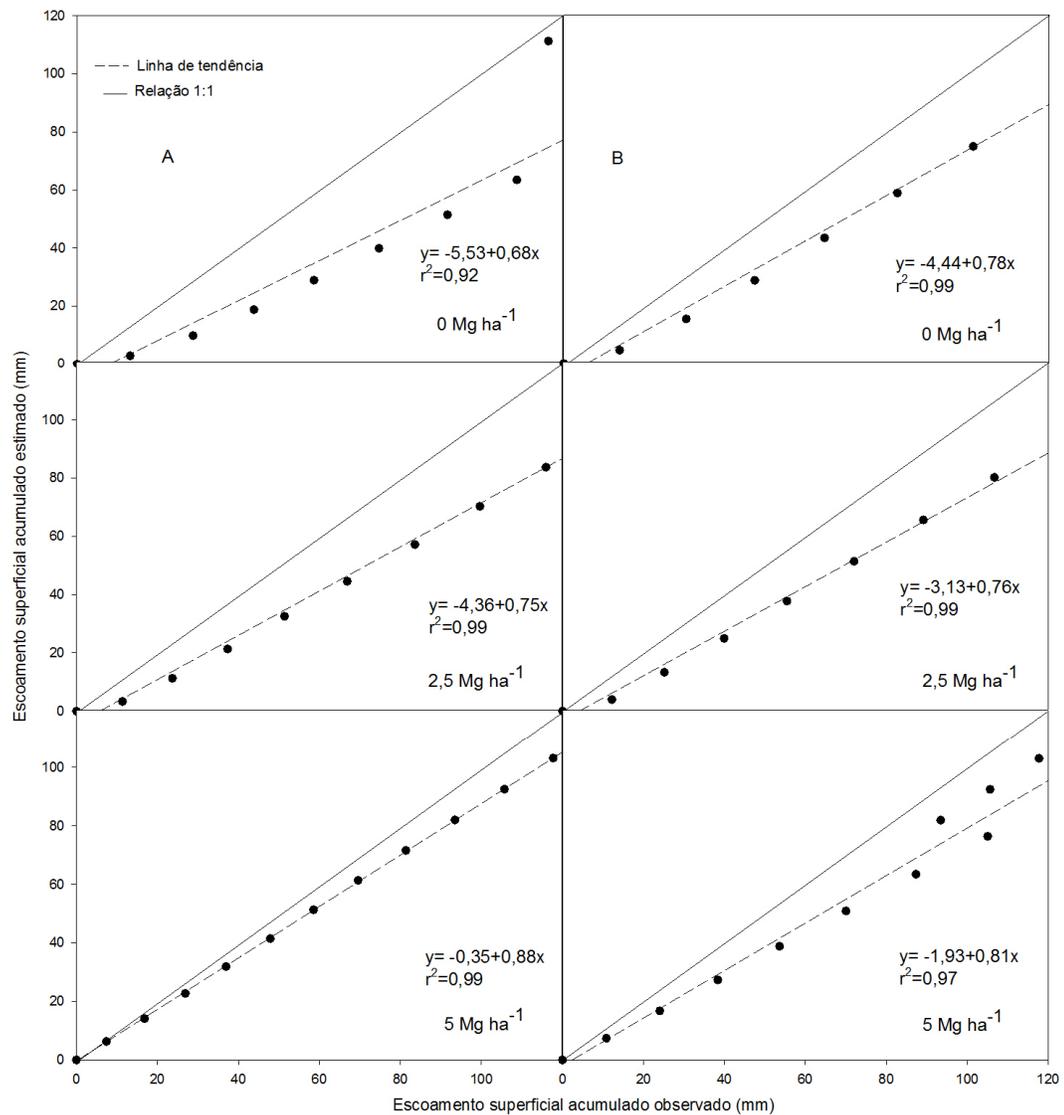


Figura 24 - Relação entre o escoamento superficial acumulado observado e o estimado pelo modelo de Smith (Chuva 2), para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo, sob uma intensidade de chuva de 120 mm h⁻¹ (A) declividade 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.

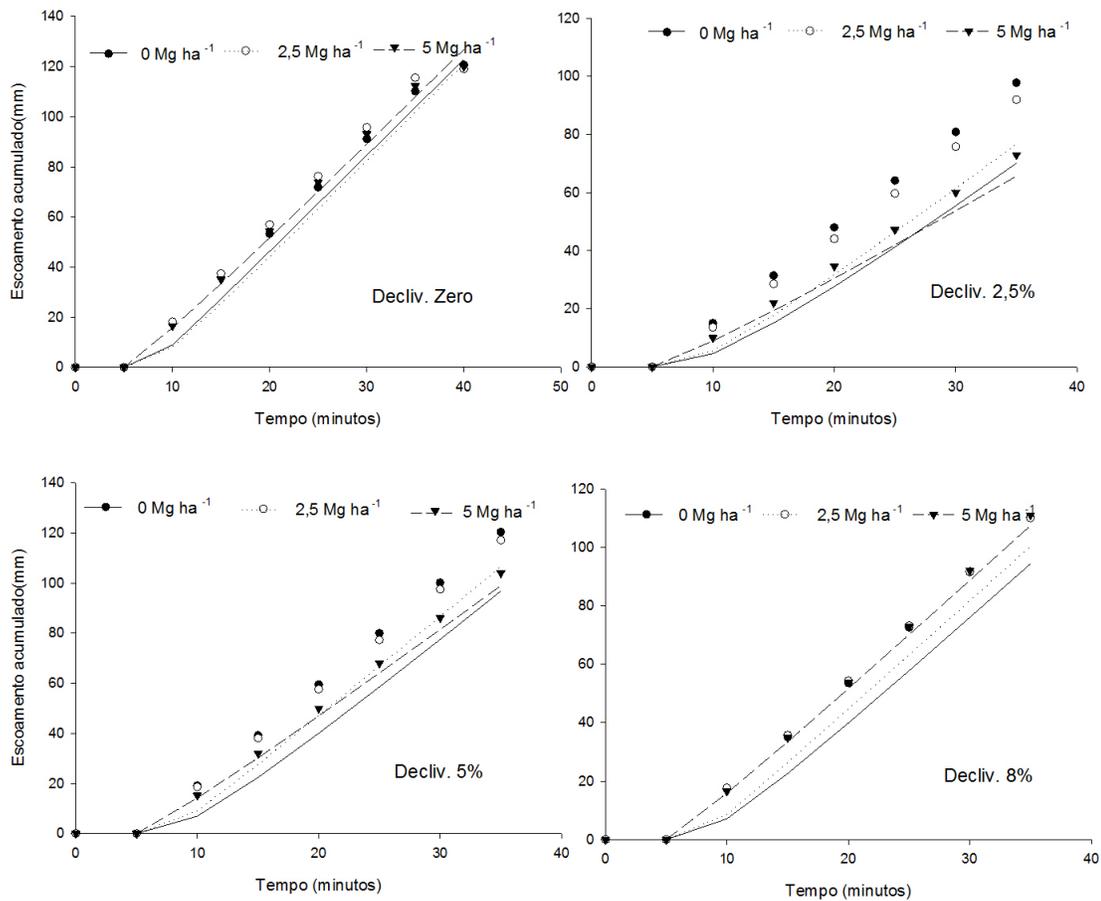


Figura 25 - escoamento superficial acumulado, (Símbolos) valores obtidos a campo, (linhas) valores ajustados pelo modelo de Smith para uma chuva de 120 mm h⁻¹(Chuva 2), em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.

Na chuva 2 (figura 25) escoamento superficial acumulado foi subestimado pelo modelo de Smith, em todas as declividades e níveis de cobertura do solo. Para a declividade de 2,5% (figura 26) o modelo de Smith subestimou em 31, 19 e 11% para as quantidades de resíduo de 0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ na superfície do solo, respectivamente.

As subestimativas foram de 20, 9 e 5%, para a declividade de 5% (figura 27), para os tratamentos com 0, 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia na superfície do solo, respectivamente.

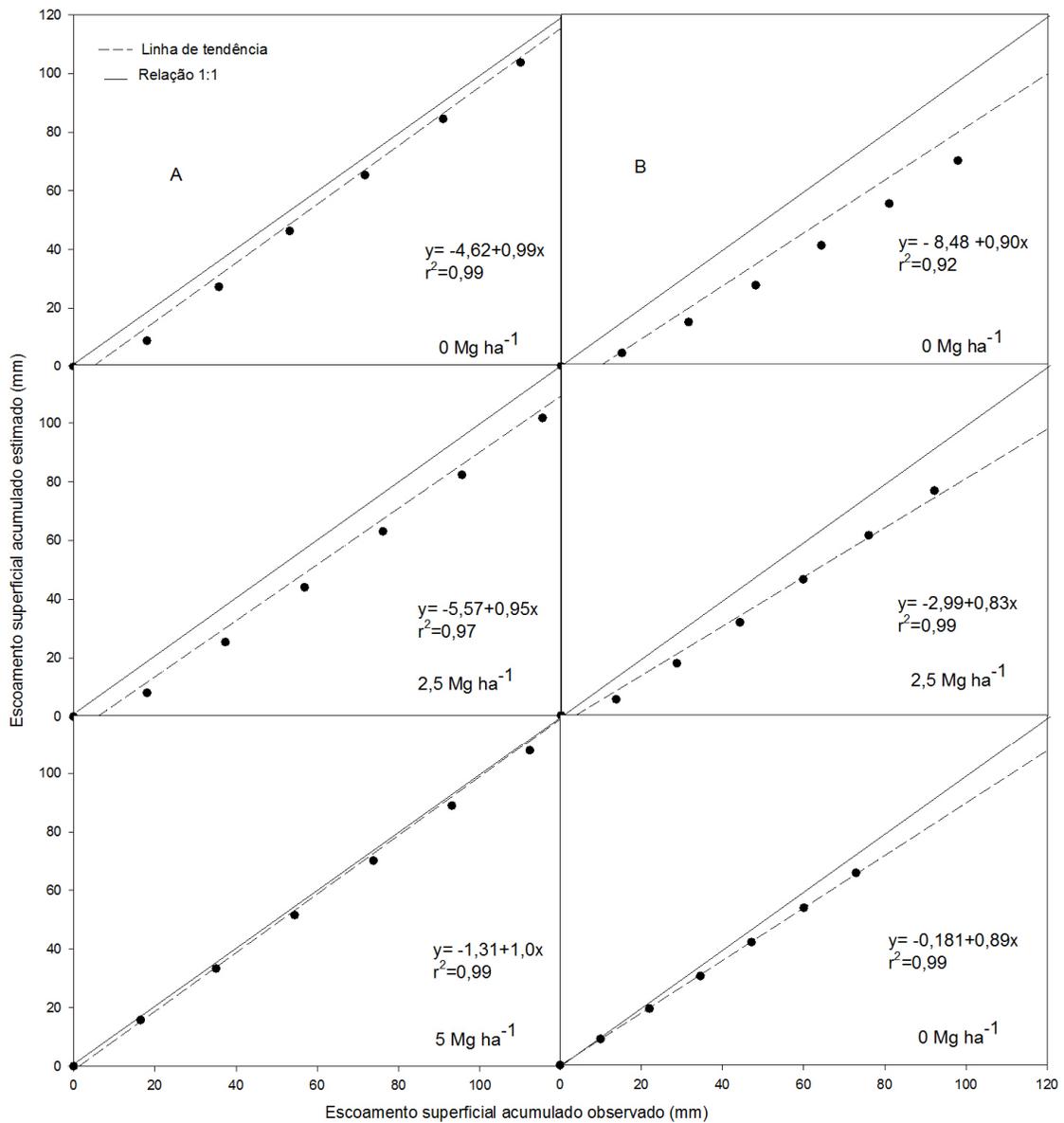


Figura 26 – Relação entre o escoamento superficial acumulado observado e o estimado pelo modelo de Smith (Chuva 2), para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e uma intensidade de chuva de 120 mm h⁻¹ (A) declividade 0% (B) declividade de 2,5%. Santa Maria, RS, 2010.

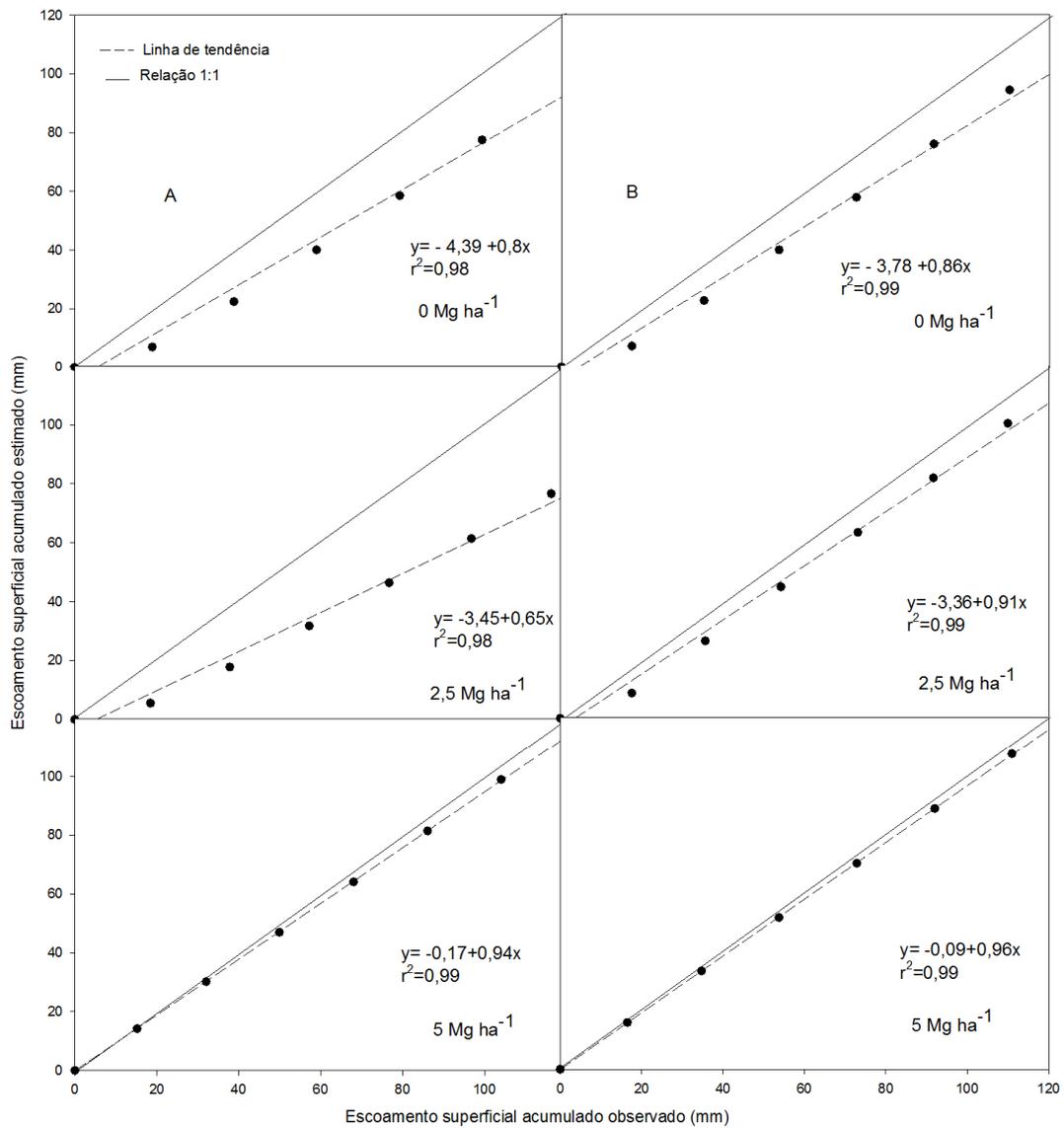


Figura 27 - Relação entre o escoamento superficial acumulado observado e o estimado pelo modelo de Smith (Chuva 2), para os diferentes níveis de cobertura da superfície do solo e uma intensidade de chuva de 120 mm h⁻¹ (A) declividade 5% (B) declividade de 8%. Santa Maria, RS, 2010.

4.7 Coeficiente de escoamento superficial

Nas figuras 28, 29 e 30 são apresentados os valores do coeficiente de escoamento superficial para as diferentes quantidades de resíduo de aveia, para as quatro declividades do terreno. Os valores variaram de zero a um esses valores quanto mais próximo de zero indicam que, menores são as perdas de água por escoamento superficial.

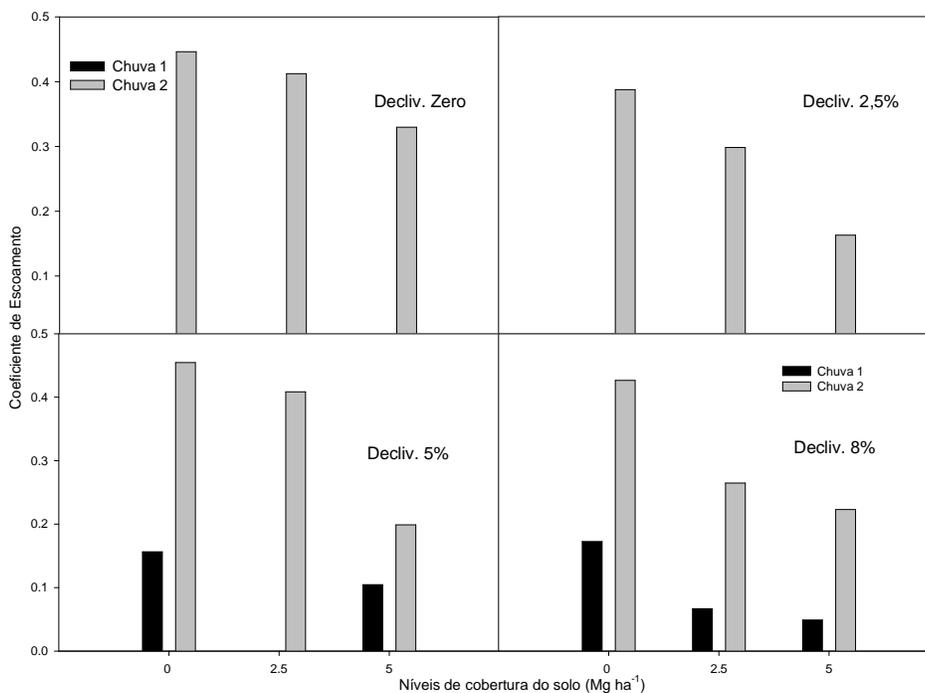


Figura 28 - Coeficiente de escoamento superficial em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno, para uma chuva de 30 mm h⁻¹. Santa Maria, RS, 2010.

Para a chuva de 30 mm h⁻¹ o coeficiente de escoamento variou de 0,1 a 0,5. Estes valores estão muito próximos aos obtidos por Pruski et al., (2003) para solo franco argiloso.

O coeficiente de escoamento superficial foi maior na chuva 2. A umidade inicial do solo mais baixa no início da aplicação da chuva 1 (Tabela 3) causou um

retardamento no tempo de início do escoamento superficial, resultando em menores perdas acumuladas por escoamento superficial. Dessa forma, os valores do coeficiente de escoamento superficial fossem reduzidos, concordando com os resultados obtidos por CARVALHO et al. (1990).

Observaram-se também menores valores de coeficiente de escoamento com o incremento dos resíduos vegetais na superfície do solo. Para a declividade de 8% (chuva 1), a utilização de 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo reduziu o escoamento superficial em 7 e 8 mm, respectivamente. Para a chuva 2, as reduções foram de 4 e 5 mm, com 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo de aveia na superfície do solo, respectivamente.

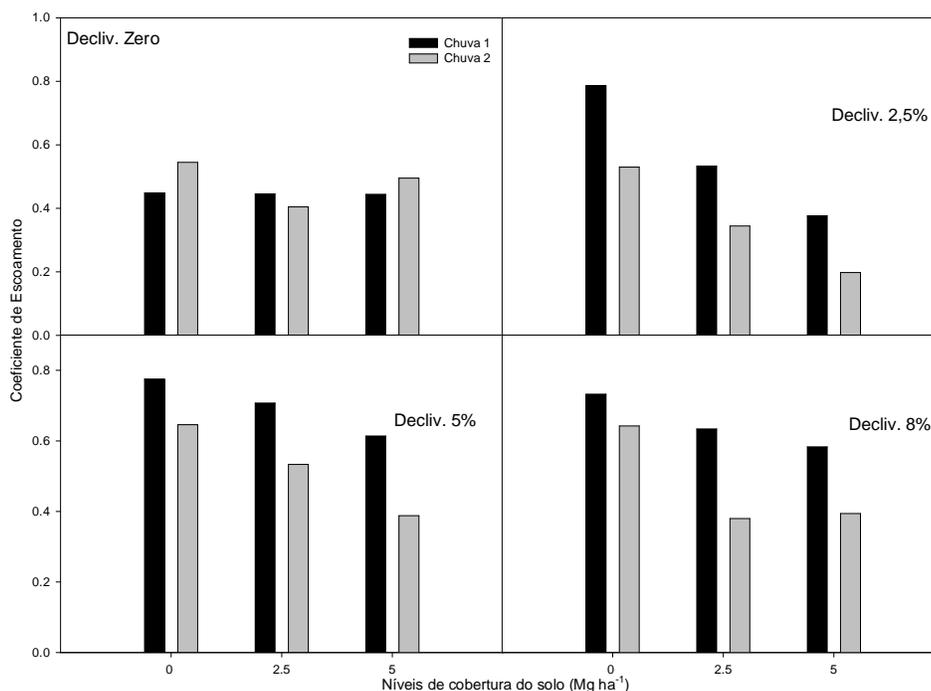


Figura 29 - Coeficiente de escoamento superficial em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno, para uma chuva de 80 mm h⁻¹. Santa Maria, RS, 2010.

Para a chuva de 80 mm h⁻¹, o coeficiente de escoamento variou de 0,2 a 0,8. Esses valores são semelhantes aos obtidos por Cassol et al. (1999) que avaliando o escoamento superficial em pastagem nativa, obtiveram um coeficiente de escoamento superficial de 0,73 para uma chuva de 64 mm h⁻¹.

Na chuva de 80 mm h^{-1} , valores de umidade inicial do solo eram maiores na chuva 2, conforme já foi apresentado anteriormente, resultando em uma maior lâmina de escoamento superficial acumulado na chuva 1.

O coeficiente de escoamento superficial foi reduzido com a adição dos resíduos vegetais na superfície do solo em todas as declividades provavelmente devido as menores perdas por escoamento superficial promovida por estes. Uma evidência que comprova este fato na a chuva 1 com declividade de 2,5%, com a aplicação de 84 mm de chuva foram perdidos por escoamento superficial 45, 29 e 17 mm, nos tratamentos com 0, 2,5 e 5 Mg ha^{-1} de resíduo de aveia na superfície do solo, respectivamente.

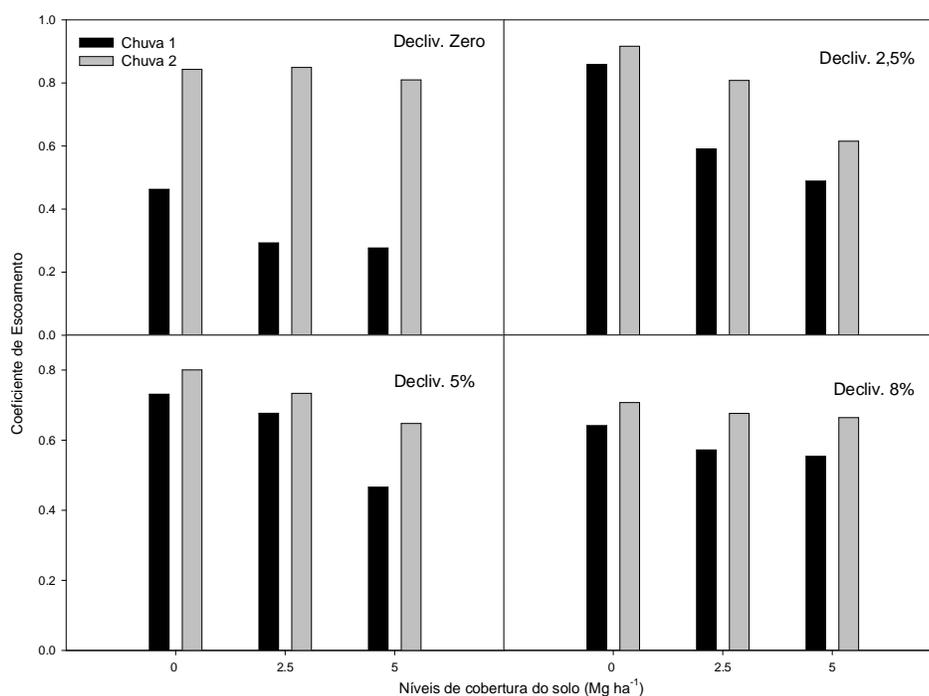


Figura 30 - Coeficiente de escoamento superficial em função dos diferentes níveis de cobertura do solo por resíduo de aveia, nas quatro declividades do terreno, para uma chuva de 120 mm h^{-1} . Santa Maria, RS, 2010.

Para as chuvas de 120 mm h^{-1} , os coeficientes de escoamento variaram de 0,3 a 0,8. VOLK et al. (2004) trabalhando com chuvas simuladas na intensidade de 120 mm h^{-1} , obtiveram coeficiente de escoamento superficial de 0,68. Nessa

situação as perdas por escoamento foram maiores na chuva 2. Com maior umidade inicial do solo, mais rápido atingiu-se a taxa de escoamento constante e maiores valores de coeficiente de escoamento foram obtidos.

A presença do resíduo na superfície do solo foi mais eficiente na redução das perdas de água por escoamento superficial na chuva 1. Na declividade de 2,5%, dos 139 mm aplicados para solo desnudo escoou 95 mm. Nos tratamentos com a presença do resíduo vegetal na superfície do solo o escoamento foi de 65 e 54 mm, com 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ respectivamente. Na chuva 2 com declividade de 2,5%, de uma aplicação de 73 mm no solo desnudo foram perdido 53 mm por escoamento superficial, enquanto que, na presença do resíduo, os valores reduziram-se a 47 e 35 mm, para os tratamentos com 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo vegetal na superfície do solo, respectivamente.

Os maiores valores do coeficiente de escoamento superficial, nas intensidades mais altas de chuva é atribuído as maiores perdas por escoamento superficial. Dessa forma, a porcentagem da chuva convertida em escoamento superficial aumentou com o crescimento da intensidade, concordando com resultados obtidos por (Pruski et al., 2003).

A redução do coeficiente de escoamento com o aumento da quantidade de cobertura na superfície do solo deve-se a redução as perdas de água por escoamento superficial. Isso porque a água permanece mais tempo retida na palha, retardando o escoamento e facilitando a infiltração.

4.8 Resumo estatístico das variáveis em estudo

O resultado da análise estatística dos parâmetros relacionados ao escoamento superficial, chuva, quantidade de resíduo vegetal, condição de umidade e declividades do terreno é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores máximos, mínimos, desvio padrão e médias das variáveis utilizadas para o conjunto de dados (216) obtidos para diferentes intensidades de chuvas simuladas e quantidades de resíduo vegetal na superfície do solo, para quatro declividades do terreno. Santa Maria, RS, 2010.

Variável	Média	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo
Intensidade da chuva (mm h^{-1})	85,28	41,5	23,3	143,3
Declividade do terreno (%)	4,03	2,9	0	8,0
Resíduo vegetal na superfície do solo (Mg ha^{-1})	2,52	2,0	0	5,0
Taxa de escoamento constante (mm h^{-1})	59,16	39,5	1,0	137,2
Tempo de início do escoamento (minutos)	13,95	21,2	1,1	101,0
Umidade inicial (%)	23,03	5,5	14,0	31,9
Umidade final (%)	33,71	3,8	27,5	41,2
Coefficiente b	2,14	3,9	0,2	5,5
Duração da chuva (minutos)	64,43	23,2	35,0	120,0
Chuva acumulada (mm)	83,97	41,8	19,4	185,1

Os valores máximos para a quantidade e intensidade da chuva foram de 185,1 mm e $143,3 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente. Os valores mínimos foram de 19,4 mm e $23,3 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente. Os valores máximos de umidade do solo inicial e final a aplicação das chuvas foram de 31,9 e 41,2%, respectivamente. Os valores mínimos foram de 14,0 e 27,5%, respectivamente.

A taxa de escoamento constante e o tempo de início de escoamento tiveram as maiores amplitudes. Essas variáveis respondem diretamente aos fatores relacionados a chuva (intensidade, duração) e as condições do terreno (declividade, quantidade de resíduo na superfície do solo, umidade do solo antecedente a chuva).

4.9 Estimativa de taxa de escoamento superficial constante e do tempo de início do escoamento superficial

O tempo de início e a taxa de escoamento superficial constante foram determinados pelas variáveis relativas à condição da superfície e estrutura do solo, da chuva (quantidade, duração e intensidade) e condições de relevo.

A partir dessas variáveis foram estimados dois parâmetros do modelo modificado de Smith e_c (taxa de escoamento superficial constante em, mm h^{-1}) e, t_e

(tempo de início do escoamento superficial em, minutos) a partir de equações de regressão multivariadas.

Na tabela 6 é apresentada a equação de regressão linear múltipla para estimativa da taxa constante de escoamento superficial (e_c) em mm h^{-1} e o coeficiente de determinação (r^2).

Tabela 6 - Equação de regressão linear múltipla para estimativa da taxa de escoamento superficial constante. Santa Maria, RS, 2010.

Variável	Coef.*	r^2 parcial
Intensidade da chuva (mm h^{-1})	0,91	0,81
Duração da chuva (minutos)	ns	
Chuva acumulada (mm)	ns	
Taxa constante de escoamento (mm h^{-1})	nc	
Tempo de início do escoamento (minutos)	nc	
Declividade do terreno (%)	ns	
Massa seca na superfície do solo (Mg ha^{-1})	ns	
Umidade inicial (%)	1,37	0,03
Umidade final (%)	-1,54	0,03
Intersecção	1,88	
r^2		0,86

r^2 parcial = contribuição de cada variável para o r^2 ; * = nível de significância de 5%, ns = não significativo, nc = não considerado

A partir dos resultados da Tabela 6, a equação de regressão linear múltipla para estimativa da taxa de escoamento superficial constante (e_c) para o conjunto de dados obtidos pode ser expressa da seguinte forma:

$$e_c = 1,88 + 0,91IC + 1,37UI - 1,54UF \dots\dots\dots (6)$$

Onde: e_c = taxa constante de escoamento superficial (mm h^{-1}), IC = Intensidade da chuva (mm/h), UI = Umidade inicial (%) e, UF = Umidade final (%).

Na figura 31 é apresentada a relação 1:1 dos dados observados e estimados pela equação 6. O elevado valor R^2 (0,86) e a dispersão homogênea dos pontos em relação à linha 1:1 indicam que a equação de ajuste apresenta boa precisão na estimativa da taxa de escoamento superficial constante. Isso pode ser observado ao comparando a linha de tendência com a linha 1:1.

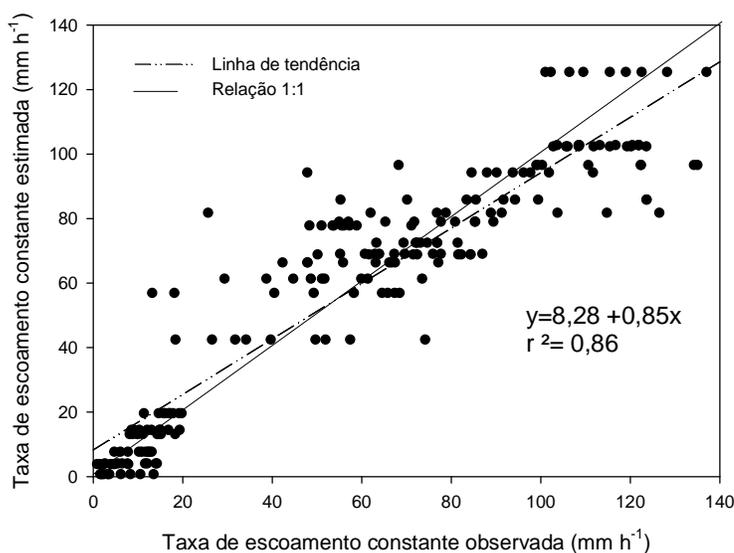


Figura 31 - Comparação entre os valores observados e estimados (equação 6) da taxa de escoamento superficial constante. Santa Maria, RS, 2010.

Na tabela 7 é apresentada a equação de regressão linear múltipla para estimativa do tempo de início do escoamento superficial (t_e) em minutos e seu o coeficiente de determinação (r^2).

Tabela 7 - Equação de regressão linear múltipla para estimativa do tempo de início do escoamento superficial. Santa Maria, RS, 2010.

Variável	Coef.*	r^2 parcial
Intensidade da chuva (mm h^{-1})	0,43	0,41
Duração da chuva (minutos)	1,07	0,10
Chuva acumulada (mm)	-0,69	0,20
Taxa constante de escoamento (mm h^{-1})	nc	
Tempo de início do escoamento (minutos)	nc	
Declividade do terreno (%)	ns	
Massa seca na superfície do solo (Mg ha^{-1})	ns	
Umidade inicial (%)	-0,84	0,04
Umidade final (%)	ns	
Intersecção	-14,60	
r^2		0,74

r^2 parcial = contribuição de cada variável para o r^2 ; * = nível de significância de 5%, ns = não significativo, nc = não considerado

A partir dos resultados apresentados na tabela 7, a equação de regressão linear múltipla para estimativa do tempo de início do escoamento superficial (t_e) para o conjunto de dados obtidos pode ser expressa da seguinte forma:

$$t_e = -14,60 + 0,43IC + 1,07DC - 0,69CA - 0,84UI \dots \dots \dots (7)$$

Onde: t_e = tempo de início do escoamento superficial, IC = Intensidade da chuva (mm/h), DC = Duração da chuva (min), CA = Chuva acumulada (mm), UI = Umidade inicial (%)

Na figura 32 é apresentada a relação 1:1 dos dados observados e estimados pela equação 7 obtida. O valor R^2 de 0,74 e a dispersão mais heterogênea dos pontos em relação à linha 1:1 indicam que a equação obtida apresenta razoável precisão na estimativa no tempo de início do escoamento superficial. Pela dispersão dos pontos em torno da linha 1:1 observa-se que a equação superestima os valores do tempo de início do escoamento superficial.

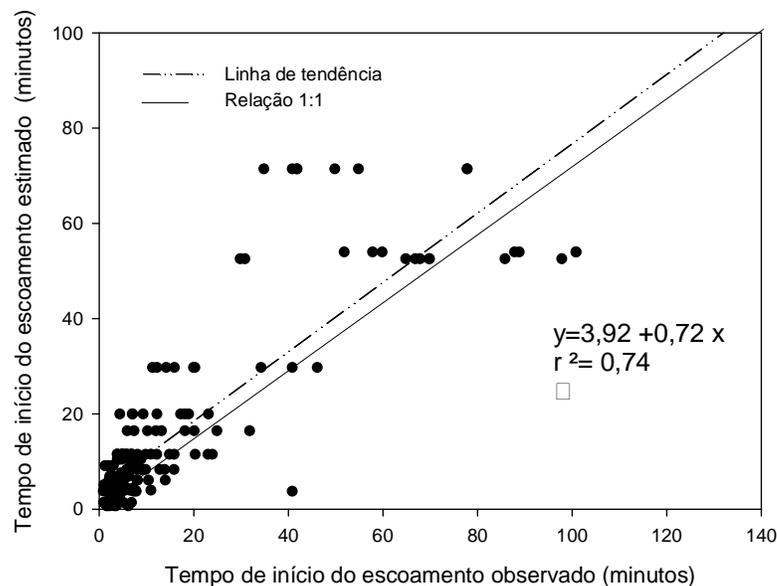


Figura 32 - Comparação entre os valores observados e estimados (equação 7) do tempo de início do escoamento superficial. Santa Maria, RS, 2010.

Observando as equações geradas (tabela 6 e 7) verifica-se que as variáveis preditivas da taxa constante (e_c) e o tempo de início do escoamento superficial (t_e),

foram as relacionadas a chuva (intensidade, duração, quantidade) e as condições de umidade do solo no início e final da chuva.

A quantidade de resíduo na superfície do solo não apresentou correlação significativa com a e_c e t_e . No entanto, com base nos resultados obtidos o efeito da massa seca foi importante para reduzir as perdas de água por escoamento superficial em todas as intensidades de chuvas para as quatro declividades do terreno.

CONCLUSÕES

Maiores intensidades de chuva, declividades do terreno e maior conteúdo de água no início das chuvas, resulta em maiores taxas de escoamento superficial constante e menor tempo de início do escoamento superficial, implicando em maior perda de água por escoamento superficial.

A presença de resíduo vegetal na superfície retarda o início do escoamento superficial e reduz a taxa de escoamento superficial constante, para diferentes intensidades de chuva (30, 80 e 120 mm h⁻¹) e declividades do terreno (zero, 2,5, 5 e 8%).

Os valores ajustados pelo modelo modificado de Smith tenderam a subestimar a taxa de escoamento superficial, independente das condições do terreno (declividades, níveis de cobertura da superfície do solo, umidade inicial do solo) e da intensidade da chuva aplicada.

As variáveis preditivas da taxa de escoamento superficial constante e do tempo de início do escoamento superficial, para o solo franco arenoso, com diferentes quantidades de resíduo vegetal na superfície do solo e declividades do terreno foram às relacionadas a chuva (intensidade, duração, quantidade) e as condições de umidade do solo, no início e final da chuva.

As equações multivariadas geradas a partir das características da chuva e do teor de umidade no solo apresentaram boa precisão na estimativa da taxa de escoamento superficial constante e o tempo de início do escoamento superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. W. et al; Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n.1, p. 136- 141, 2002.

ALVES, M. C.; CABEDA, M. S. V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando precipitação simulada com duas intensidades, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 753-761, 1999.

ALVES SOBRINHO, T. et al; 2003. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.7, n.2, p.191-196, 2003.

ALVES SOBRINHO, T. et al; Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande PB, v. 6, n. 2, p. 337-344, 2002.

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.E.A.S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. *Acta Sci.*, 26:27-34, 2004.

ANKENY, M. D. et al; Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 837-840, 1994.

ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R. Infiltração de água em Cambissolos do Baixo Irecê (Ba), **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 263-370, 1996.

BARCELOS, A. A. et al; Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de precipitação intensa em diferentes sistemas de manejo, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 35-43, 1999.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**, 6 ed. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 2002, 596 p.

BERTOL, I. Avaliação da erosividade da precipitação na localidade de Campos Novos (SC) no período de 1981-1990. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 9, p. 1453-1458, 1994.

BERTOL, I. et al; Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.

BERTOL, I. et al; Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após a colheita de milho e trigo, na presença e ausência de resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 409-418, 1997.

BERTOL, I. et al; Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff under different soil tillage systems during soybean growth. **Soil & Till, Res**, 2007.

BERTOL, I. et al; Parâmetros relacionados com a erosão hídrica sob taxa constante da enxurrada, em diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, 2006.

BERTONI, J. C.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**, São Paulo: Ícone, 1990.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 2. ed., São Paulo: Editora Ícone, p. 352, 1993.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação, In, TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**, 2. ed, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

BRAGAGNOLO, L.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 369-374, 1990.

BRYAN, R. B. The influence of slope angle on soil entrainment by sheetwash and rainsplash. **Earth Surface Process**, Philadelphia, v 4, n. 1, p. 43-58, 1979.

CAUDURO, F.A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e campo para irrigação e drenagem**, Brasília: PRONI/MA, 1988, p. 216.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F.L. **Água no solo: Parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação**, Santa Maria: UFSM/ Departamento de Engenharia Rural, 2000.

CARVALHO, F. L. C. et al; Eficácia relativa de doses e formas de manejo do resíduo cultural de trigo na redução da erosão hídrica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 227-234, 1990.

CASSOL, E.A.et al; Infiltração de água e perdas de água e solo por erosão influenciadas por diferentes métodos de melhoramento da pastagem nativa gaúcha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.923-931, 1999.

CASTRO, L. G. et al; Alterações na rugosidade superficial do Solo pelo preparo e pela precipitação e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 339-352, 2006.

CECÍLIO, R. A. Et al; Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande PB, v. 7, n. 3, p. 415-422, 2003.

COGO, N.P. **Effect of residue cover, tillage induced-roughness, and slope length on erosion and related parameters.** 1981. 346p. (Tese de Doutorado) West Lafayette, Purdue University.

COGO, N.P. et al; Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.743-753, 2003.

CHAVES, H. M. L. et al. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 141-147, 1993.

DAKER, A. **A água na agricultura: irrigação e drenagem**, 6. ed, Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1984.

DASTANE, N. G. **Effective rainfall and irrigated water requirements**, Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 25, 1974.

DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil:** Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo, Londrina, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1991, 268 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. **Manual de métodos de análise de solo**, Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, EMBRAPA produção de informação, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, p. 412, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, p. 247, 1979.

ELTZ, F. L. F. et al; Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p. 259-267, 1989.

EVERTS, C. J.; KANWAR, R. S. Interpreting tensioninfiltrometer data for quatifying soil macropores:some pratical considerations, **Trans, Am, Soc, Agric, Eng.**n. 36, p. 423-428, 1992.

FOSTER, G. R. Modelling the erosion process, In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H. D.; BRAKENSIEK, D. L. (ed.) **Hydrologic modeling of small watersheds**, St, Joseph, ASAE, p. 297-380, 1982.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis, In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**, Part 1, 2 ed, Madison, American Society of Agronomy, 1986.

HORTON, R. E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Sci. Soc. Proc.**, 4:399-417. 1940.

HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**, Academic Press, Orlando, 1980.

KERTZMANN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação**, 1996, 153 f, Tese (Doutorado), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1996.

KINNELL, P. I. A.; CUMMINGS, D. Soil slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 36, n. 2, p. 381-387, 1993.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**, São Paulo: Nobel, 1984, 408 p.

KUHN, N. J.; BRYAN, R. B. Drying, soil surface condition and interrill erosion on two Ontario soils, **Catena**, v. 57, p. 113-133, 2004.

LANG, K. J. et al; Interrill erosion as an index of mined land erodibility, **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 27, n. 1, p. 99-101, 1984.

LATTANZI, A. R. et al; Influences of mulch rate and slope steepness on interrill erosion. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 38, n. 6, p. 946-950, 1974.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.

LOPES, P. R. et al; Eficácia relativa de tipo e quantidade de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo na redução da erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 71-75, 1987.

LOMBARDI NETO, F.; et al. Efeito da quantidade de resíduos culturais de milho nas perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.71-75, 1988.

MANNERING, J. V.; MEYER, L. D. The effects of various rates of surface mulch on infiltration and erosion. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 27, n.1, p. 84-86, Jan/Feb, 1963.

MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Interrill runoff and erosion: Effects of row-sideslope shape, rain energy, and rain intensity. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 35, n. 4, p. 1199-1203, 1992.

MICHELON, C. J. **Qualidade física de solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil Central**. 2005. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46p.

MORIN, J.; VAN WINKEL, J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 1223-1227, 1996.

OKA, T. **Rainfall infiltration and macropores in a hillside slope**, In FOK, Y, (ed), **Infiltration principles and practices**, Honolulu: Water Resources Research Center, 1988, p. 168-177.

OWOPUTI, L. O.; STOLTE, W.J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review. **Transactions of the ASAE**, St, Joseph, v. 38, n. 4, p. 1099-110, 1995.

PERROUX, K. M.; WHITE, I. Designs for disc permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 5, p. 1205-1215, Sept/Oct, 1988.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 19-27, 2003.

PRUSKI, F. F. Aplicação de modelos físicomatemáticos para a conservação de água e solo, In: SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. (Coord.), **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**, Viçosa, MG: UFV, 1997.

PRUSKI, F. F. et al, **Infiltração da água no solo**: Engenharia na Agricultura, Caderno Didático 25, 1997.

PRUSKI, F. F. et al, **Escoamento Superficial**. Viçosa, UFV, p. 88, 2003.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 5. The influence of the initial moisture content. **Soil Sci.**, 40:329-39. 1957.

REICHARDT, K. Infiltração da água no solo, In: **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**, Ed. 2, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, p. 317-352, 1996.

REICHERT, J. M. et al; Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, n. 3, p. 289-298, 1992.

REICHERT, J. M. et al; **Qualidade de solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas**. Revista Ciência e Ambiente, ed. 27, p. 29 – 48, Santa Maria, 2003.

REINERT, D. J. et al; Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado, In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; CERETTA, C. A., **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**, editora Palloti; v. 1; p. 114 – 133; Santa Maria; RS; 2001.

ROMERO, A. L.; GRANÃ, R. C. Modelos para el cálculo de la lluvia efectiva y su aplicación en caña de azúcar, **Caña de Azúcar**, n. 17, p. 3-20, 1999.

ROTH, C. H. et al, A portable rainfall simulator for studying factors affecting runoff, infiltration e soil loss, **Catena**, Amsterdam, v. 12, p. 79-85, 1985.

SALES, L. E. O. et al; Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2091-2095, 1999.

SAMPAIO, S. C. et al; Estudo da precipitação efetiva para o município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande PB, v. 4, n. 2, p. 210-213, 2000.

SANTOS, A. B.; SILVA, O. F.; FERREIRA, E. Avaliação de práticas culturais em um sistema agrícola irrigado por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 3, p. 317-327, 1997.

SEGUÍ, J. P. et al; **Riego y Drenage**. Ed. Pueblo y Educación: Havana, Cuba, p. 414, 1995.

SCHICK, J. et al; Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II, Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 437-447, 2000.

SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Infiltration measurements with double ring infiltrometers and a rainfall simulator under different surface conditions on an Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 161-168, 1987.

SILVA, C. G. **Perdas de solo e de água e características de infiltração em sistemas de plantio direto e convencional**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Dourados, 2003.

SILVA, C. L. A. et al; Modelagem da precipitação efetiva na cultura do milho. **Pesquisa, Agropecuária, Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 6, p. 929-937, 1994.

SILVA, C. L. A.; KATO, E. Avaliação de modelos para a revisão da infiltração de água em solos sob cerrado, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1149-1158, 1998.

SILVA, D. D. et al; Escoamento superficial para diferentes intensidades de precipitação e porcentagens de cobertura num podzólico vermelho amarelo com preparo e cultivo em contornos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 21, n. 1, p. 12-21, 2001.

SILVA, D. D. et al; Efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho Amarelo utilizando simulador de precipitação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 409-419, 2005.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**, 2003. 171f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVEIRA, R. C.; SALVADOR, N. **Uso de simulador de chuva no estudo de perdas de solo e água em parcelas com resíduos culturais de milho**. *Ciência Agrotécnica*; v. 24; n. 3; p. 718 – 729; 2000.

SINGH, B. et al; Residue and tillage management effects on soil properties of a Typic Cryoboroll under continuous baley. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 32, p. 117-133, 1994.

SLONEKER, L. L.; MOLDENHAUER, W. C. Measuring the amounts of crop residue remaining after tillage. **J, Soil Water Conserv**,, v. 32, p. 231-236, 1977.

SPOHR, R. B. **Influência das características físicas do solo nas perdas. de água por escoamento superficial no sul do Brasil e Uruguai**. 2007. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

TORMENA, C. A. **Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo**, 1998. 106f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

VOLK, L. B. S.et al; Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.763-774, 2004.

WATSON, D. A.; LAFLEN, J. M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 29, n. 1, p. 98-102, 1986.

WEST, L. T.et al; Cropping system effects on interrill soil loss in the Georgia Piedmont. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 2, p. 460-466, Mar/Apr, 1991.

YOUNG, R. A.; WIERSMA, J. L. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. **Water Resources Research**, Washington, v. 9, n. 6, p.1629-36, 1973.

ZIMMERMANN, F. L. **Crescimento de plantas de milho e armazenamento de água no solo em dois sistemas de cultivo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.